

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN



PROYECTO DE FIN DE CARRERA

Optimización de un Sistema Dual
de Imagen Infrarroja para Aplicación
en Técnicas de Análisis No Invasivo

AUTOR: Hugo Álvarez García
TUTOR: Antonio J. de Castro González
DIRECTOR: Francisco Cortés Martínez

2 de octubre de 2013

TÍTULO: *Optimización de un sistema de imagen infrarroja dual para técnicas de análisis no invasivo.*

AUTOR: *Hugo Álvarez García*

TUTOR: *Antonio J. de Castro González*

DIRECTOR: *Francisco Cortés Martínez*

La defensa del presente Proyecto Fin de Carrera se realizó el día 9 de Octubre de 2013; siendo calificada por el siguiente tribunal:

PRESIDENTE: *Juan Meléndez Sánchez*

SECRETARIO: *Ramón Martín Solís*

VOCAL: *María Julia Fernández-Getino García*

Habiendo obtenido la siguiente calificación:

CALIFICACIÓN:

Presidente

Secretario

Vocal

Agradecimientos

A la hora de escribir esta parte del Proyecto de Fin de Carrera, he recordado miles de momentos vividos en estos años de carrera, imágenes con compañeros, profesores, recuerdos inolvidables, algunos de disfrute, otros de duro trabajo en su compañía. Quiero agradecer a todos mis compañeros, y a los profesores que supieron transmitirme no sólo sus conocimientos académicos, sino también una actitud hacia la vida basada en la pasión por lo que uno hace y en el respeto mutuo.

Entre ellos quiero hacer mención a todos mis compañeros y profesores del Laboratorio de Infrarrojos y del Laboratorio de Sensores Espectrales, que me han acompañado en estos dos últimos años de carrera, durante la realización de este proyecto y la superación de mis últimas asignaturas, y me han descubierto el enorme abanico de posibilidades de la tecnología infrarroja. A María Julia, tutora de equipo en la competición de ingeniería «Airbus-Fly Your Ideas», gracias por compartir con nosotros tanta ilusión y luchar por ella hasta el final.

Quiero agradecer a mi familia por su cariño y por los valores que siempre me han transmitido. Especialmente a mis padres y hermano, por su completa cercanía a pesar de la distancia; a ellos les dedico este Proyecto de Fin de Carrera.

Gracias a todos.

A mis padres y a mi hermano.

Resumen

La industria de materiales presenta un nivel de innovación continuo y cada día crece el número de aplicaciones en las que se emplean nuevos compuestos. Estos materiales sintéticos tienen propiedades muy beneficiosas en estructuras conocidas o incluso dan lugar a otras nuevas, un ejemplo de ello son los de fibra de carbono en la industria aeronáutica, que destacan por su ligereza y resistencia mecánica. De hecho, actualmente el fuselaje de las últimas aeronaves está compuesto por algo más del 50 % de materiales compuestos, lo que reduce su masa entre un 20 y un 30 %, con el correspondiente impacto en su consumo de combustible, emisiones de gases, tasas aeroportuarias, etc.

Esta evolución requiere un análisis que valide cada material bajo los requisitos de seguridad y fiabilidad necesarios en cualquier sistema, máxime aplicados en la industria de transporte civil, y deben superar pruebas muy exigentes en todos los ámbitos, siendo la *resistencia al fuego* uno de ellos.

En paralelo al desarrollo de nuevos materiales, la tecnología que permite su análisis cuantitativo también crece. Particularmente, la tecnología no invasiva y sin contacto presenta grandes beneficios, puesto que no interfiere en el comportamiento del material, componente o estructura.

Hoy en día, en el caso particular de resistencia al fuego, se estudia dicho comportamiento aplicando una llama sobre una muestra de material y observando el tiempo que tarda en atravesar la llama el material. Es por tanto de gran interés para la industria una visión diferente y un estudio más exhaustivo y cuantitativo del comportamiento de estos nuevos materiales frente al fuego.

La tecnología de *imagen infrarroja* es una herramienta de grandes prestaciones para estos fines, ya que:

- Permite analizar simultáneamente toda la superficie de un material.

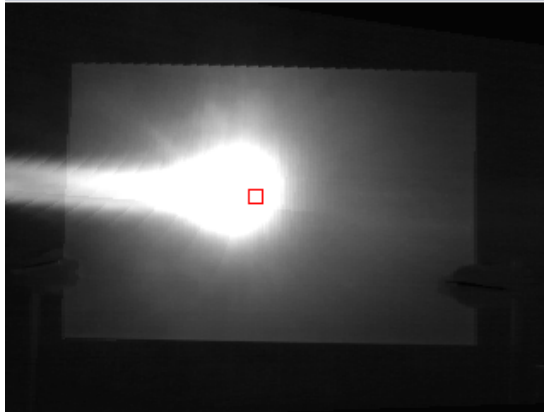
-
- Permite el análisis a distancia.
 - Permite la visión del interior del material, a través de la superficie.
 - Permite el análisis del comportamiento en servicio de materiales.

En este marco, el *Laboratorio de Infrarrojos* de la Universidad Carlos III de Madrid (*LIR*) dispone de cámaras infrarrojas que permiten el análisis cuantitativo. Particularmente, en el seno de este grupo se realiza la *medida con precisión de la respuesta al fuego de materiales, componentes y estructuras*. La instrumentación infrarroja permite realizar medidas no invasivas (a distancia y sin interferir en el ensayo), medir la temperatura del objeto sometido a fuego sin que interfiera la llama mediante un *análisis espectral*, y además, se realiza el análisis con gran resolución espacial: no sólo se obtienen valores de temperatura en el punto determinado de la probeta que nos ofrecería un termopar, sino en todos los puntos de la misma y con una resolución espacial muy alta. En la figura [1a](#) mostramos una imagen de la cara caliente de un panel de composite sometido a fuego, y en las figuras [1b](#), [1c](#) y [1d](#) la evolución de la temperatura en tres puntos distintos del panel con diferente excitación térmica.

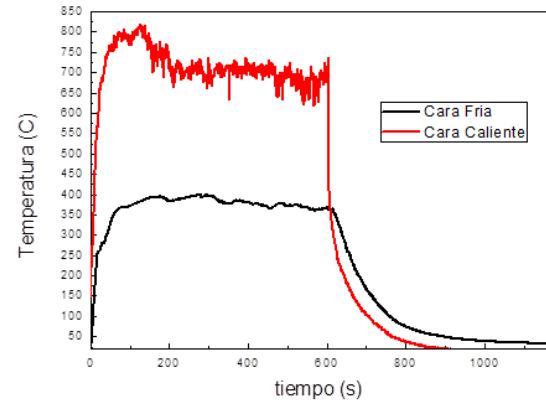
A groso modo, podemos considerar una estructura de material sintético como un sistema con respuesta desconocida a una potente excitación térmica. Como en cualquier sistema con respuesta desconocida, esto se realiza introduciendo un estímulo conocido, que en nuestro caso será la llama de un quemador, y midiendo su temperatura en todo instante, tanto en la cara de la llama (*cara caliente*), como en la cara opuesta (*cara fría*). En la figura [2](#) se puede ver con más detalle esta evolución para el mismo punto de la probeta. Durante el proceso de medida, el material compuesto cambia su comportamiento debido a los efectos producidos en las distintas capas de materiales que lo componen, por lo que es preciso medir la respuesta durante un largo período de quema y con suficiente resolución temporal para apreciar los cambios.

El sistema que permite determinar el comportamiento de estos objetos sometidos a fuego en el laboratorio, es el *Sistema Dual de Perfiles Térmicos*, cuyas principales funcionalidades son:

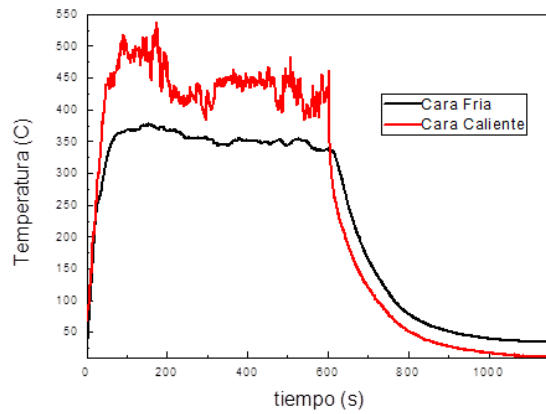
- Monitorizar en IR ambas caras del espécimen durante el ensayo.
- Sincronización temporal de ambas imágenes
- Corregración espacial de ambas imágenes



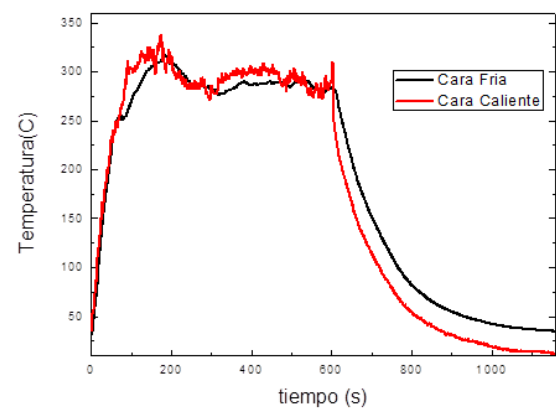
(a) Vista del panel desde la cara caliente



(b) Punto sobre llama



(c) Punto en el borde de la llama



(d) Punto lejos de la llama

Figura 1: Imagen del panel sometido a fuego y evolución temporal de su temperatura en tres puntos y en ambas caras del mismo.

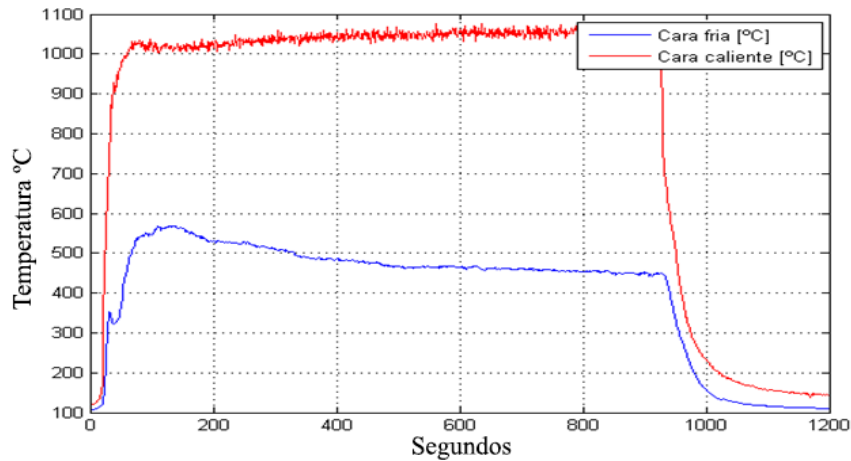


Figura 2: Evolución temporal de un punto de una estructura de composite sometida a fuego. Se pueden apreciar cambios en las propiedades térmicas durante las tres etapas de la quema (calentamiento, régimen estacionario y enfriamiento)

Los objetivos particulares de este proyecto son optimizar las prestaciones del *Sistema Dual de Perfiles Térmicos* disponible en el Laboratorio de Infrarrojos de la UC3M, mediante la incorporación de los siguientes funcionalidades:

- Sustitución de la antigua cámara *Indigo Merlin Uncooled* por la nueva *SENSIA SIS 384.L*.
- Incorporación de funciones de control de la nueva cámara en el software principal.
- Optimización del programa para un mejor rendimiento y constatar su fiabilidad en ensayos destructivos.
- Migración del sistema a un ordenador portátil y de mejores prestaciones que el antiguo.
- Permitir programar una frecuencia de adquisición variable durante el ensayo. Es de gran interés capturar a mayor tasa de adquisición durante los periodos de calentamiento y enfriamiento de la probeta, donde se producen los principales cambios de estado del material. En la figura 2, se aprecian perfectamente tres etapas principales: calentamiento, estacionaria, y enfriamiento.
- Pruebas de fiabilidad

Esta memoria está estructurada de la siguiente manera:

-
1. Una primera parte de **introducción** (Parte **I**), donde se describen los conceptos básicos de radiometría, parámetros ópticos, y figuras de mérito de detectores infrarrojos, así como las técnicas de medida cuantitativa en el espectro infrarrojo con estos dispositivos.
 2. A continuación se describe el trabajo realizado para la optimización del *Sistema de Adquisición Dual* (Parte **II**):
 - a) Una descripción de la instrumentación empleada (Capítulo **4**). Esto es: una cámara infrarroja para la monitorización de la cámara caliente, y otra para la cara fría.
 - b) Un resumen de funcionamiento de nuestro software completo (Capítulo **5**).
 - c) Para el control de cámara empleada en la cara caliente, se ha programado una **librería de comunicación en C++** (Capítulo **6**), con idea de realizar un software que sirva de base para trabajos futuros y poder adaptarla fácilmente para ser integrada en *LabVIEW*, donde se realizará el programa de adquisición. Consiste en una librería que comunique ciertos comandos para el manejo de la cámara a través del puerto serie del ordenador y así evitar el uso de software añadido e independiente del nuestro.
 - d) Una descripción del programa final en LabVIEW (Capítulo **7**), donde se entra en cuestiones más específicas y claves para garantizar las prestaciones necesarias de nuestro sistema de adquisición en tiempo real. En ella se comienza con una breve introducción a LabVIEW, se explica la adaptación de nuestra librería de C++ para ser usada en LabVIEW, y se detallan los parámetros utilizados en otras librerías propietarias que han sido necesarias en nuestro código. Así mismo, se presenta la interfaz gráfica del programa realizado y las instrucciones para su manejo.
 3. Otra parte será los **experimentos y resultados** (Parte **III**). Donde se valida el funcionamiento del sistema
 4. Finalmente, en la Parte **IV**, se escriben las conclusiones en base a estos resultados, y se proponen nuevas líneas de trabajo para las que este proyecto puede servir de base.

Antes de finalizar el documento, se encuentra el **presupuesto** del mismo y los **apéndices**.

Índice general

I	INTRODUCCIÓN A LA TECNOLOGÍA INFRARROJA	23
1.	Introducción a la Radiometría	27
1.1.	Espectro electromagnético: la <i>Radiación Infrarroja</i>	27
1.2.	Conceptos básicos de radiometría	30
1.2.1.	Definición de radiancia	31
2.	Óptica y Detectores	33
2.1.	Lentes	33
2.2.	Detectores	34
2.2.1.	Parámetros y figuras de mérito de sensores infrarrojos	34
2.2.2.	Tipos de detectores	36
3.	Medida Cuantitativa en Infrarrojo	41
3.1.	Proceso de Transferencia Radiativa	42
3.2.	Calibración y Corrección de No-Uniformidad	43
3.2.1.	Corrección de No-Uniformidad	44
3.3.	Imagen multiespectral e hiperespectral	47
II	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DUAL	49
4.	Instrumentación empleada	53
4.1.	FLIR A325: Cara fría	53
4.2.	Sensia SIS 384.L Uncooled: Cara caliente	53

5. Resumen de funcionamiento	57
5.1. Inicio	59
5.2. Visualización	59
5.3. Adquisición	60
5.4. Cambios de ajustes	61
6. Software de control para la cámara Sensia	63
6.1. Descripción de la comunicación UART	64
6.2. Estructura e implementación de la API en C++	64
6.2.1. Capa física: Clase <i>CComport</i>	64
6.2.2. Protocolo de Comunicaciones SCD Bird	66
6.2.3. Capa de Enlace implementada: Clase <i>scdcomm</i>	67
6.2.4. Capa de Sesión implementada: API de comunicación	68
7. Diseño e Implementación en <i>LabVIEW</i>	75
7.1. Introducción a <i>LabVIEW</i>	75
7.2. Adaptación de la API para <i>LabVIEW</i>	76
7.3. Librería de adquisición <i>ImperX</i> para <i>LabVIEW</i>	80
7.4. Software <i>Thermovision LabVIEW Toolkit</i>	82
7.5. Descripción del Panel Frontal	84
III EXPERIMENTOS Y RESULTADOS	91
8. Experimentos Realizados	95
8.1. Pruebas de memoria	95
8.2. Pruebas de velocidad de adquisición	96
8.3. Prestaciones del sistema	99
9. Resultados	101
IV CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	105
APÉNDICES	108

A. PRESUPUESTO DEL PROYECTO	111
B. Panel Frontal del Programa	115

Lista de Figuras

1.	Imagen del panel sometido a fuego y evolución temporal de su temperatura en tres puntos y en ambas caras del mismo.	11
2.	Evolución temporal de un punto de una estructura de composite sometida a fuego. Se pueden apreciar cambios en las propiedades térmicas durante las tres etapas de la quema (calentamiento, régimen estacionario y enfriamiento)	12
1.1.	Espectro electromagnético	28
1.2.	Ventanas de Transmisión en IR	30
1.3.	Definición de Radiancia	31
3.1.	Ejemplo sencillo de teledetección IR	43
3.2.	Comparativa de imagen antes y después de realizar la NUC	46
4.1.	Cámara FLIR A325	53
4.2.	Vista de perfil Cámara Sensia SIS 384.L Uncooled	55
4.3.	Vistas frontal y trasera de la cámara Sensia SIS 384.L Uncooled	56
5.1.	Diagrama de flujo general	58
6.1.	Comunicación PC a placa de comunicaciones SCD BIRD	63
6.2.	Conexión con Engine Control	70
6.3.	Captura de datos en puerto serie	71
7.1.	Instrumento Virtual de Ejemplo	76
7.2.	ToolBox de Comunicación Serie	77

7.3. Diagrama de bloques SCD Shutter	79
7.4. Diagramas de Bloque de los VIs Setup y Setup Header	80
7.5. Configuración de los datos de enlace CameraLink	81
7.6. Configuración de la cola del FrameGrabber ImperX	82
7.7. Configuración del VI Thermovision Open	83
7.8. Configuración del VI Thermovision Get Img	83
7.9. Diagrama de Bloques para el enfoque de la FLIR A325	84
7.10. Subpanel del Selector de Cámaras	85
7.11. Subpanel de Configuración de Adquisición	86
7.12. Subpanel de Progreso de Adquisición	87
7.13. Subpanel de Enfoque de la cámara FLIR A325	88
7.14. Subpanel de Configuración de la cámara Sensia SIS	89
8.1. Test de ciclo de ejecución excedido	96
9.1. Escenario de quema con nuestro sistema	101
9.2. Vistas del panel desde ambas cámaras	102
9.3. Vista del programa visualizando	102
9.4. Quemador encendido y capturando	103
9.5. Instante de la quema con algunos compañeros y profesores del LIR	103
9.6. Imágenes radiométricas de ambas caras del panel de material compuesto en el mismo instante de la quema	104
B.1. Panel Frontal	116

Lista de Tablas

1.1. Principales bandas del Espectro Electromagnético	28
1.2. Bandas del Infrarrojo	29
4.1. Especificaciones cámara FLIR A325	54
4.2. Especificaciones cámara Sensia SIS 384.L	56
6.1. Formato de Comando	66
6.2. Formato de Comando <i>BIRD Setup</i>	68
6.3. Formato de Comando <i>BIRD Setup Header</i>	68
6.4. Estructura del Comando <i>BIRD Setup</i>	69
6.5. Ejemplo de Setup para cambio de ganancia	71
6.6. Formato de Comando <i>Shutter Setup</i>	72
6.7. Estructura del Comando <i>Shutter Setup</i>	72
8.1. Tabla de pruebas de memoria	97
8.2. Tabla de pruebas de tiempos	98
8.3. Prestaciones en Modo Dual	99
8.4. Prestaciones en Modo A325	99
8.5. Prestaciones en Modo Sensia	100
A.1. Fases del Proyecto	111
A.2. Personal	112
A.3. Equipos	112
A.4. Otros costes directos	113

A.5. Presupuesto 113

Parte I

INTRODUCCIÓN A LA TECNOLOGÍA INFRARROJA

La radiación infrarroja fue descubierta en 1800 por William Herschel, un astrónomo inglés de origen alemán [5]. Herschel colocó un termómetro de mercurio en el espectro obtenido por un prisma de cristal con el fin de medir el calor emitido por cada color. Descubrió que el calor era más fuerte al lado del rojo del espectro y observó que allí no había luz. Esta es la primera experiencia que muestra que el calor puede transmitirse por una forma invisible de luz. Herschel denominó a esta radiación «rayos calóricos», denominación bastante popular a lo largo del siglo XIX que, finalmente, fue dando paso al más moderno de radiación infrarroja.

Sin embargo tuvieron que pasar más de 30 años para que el enorme potencial de esta forma de energía pudiera tener el reconocimiento que merecía. Desde entonces, ha habido un enorme progreso tanto en el desarrollo teórico como aplicado de las propiedades del espectro infrarrojo.

Durante el siglo XIX y la primera parte del siglo XX tuvo un papel relevante el desarrollo y validación de los fundamentos de la radiación térmica. Los ejemplos más destacados son:

- la *Ley de Stefan-Boltzmann*,
- la *Ley de desplazamiento de Wien*,
- y la *Ley de Planck*.

Es primordial conocer los conceptos básicos que involucran la ciencia y tecnología infrarroja en que se basa este proyecto. Por una parte, los fundamentos de radiometría. Por otra, la óptica y detectores empleados en nuestra instrumentación.

Introducción a la Radiometría

La radiometría es la ciencia que describe la energía o potencia transferida desde una fuente a un detector. Antes de entrar precipitadamente en conceptos de radiometría, no está de más, dadas las diferentes naturalezas de radiación existentes, repasar el espectro electromagnético y ubicarnos especialmente en la banda que nos ocupa.

1.1. Espectro electromagnético: la *Radiación Infrarroja*

Se denomina *espectro electromagnético* a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas [5]. Referido a un objeto se denomina espectro electromagnético o simplemente espectro a la radiación electromagnética que emite (espectro de emisión) o absorbe (espectro de absorción) una sustancia. El espectro electromagnético se extiende desde la radiación de menor longitud de onda, como los rayos gamma y los rayos X, pasando por la luz ultravioleta, la luz visible y los rayos infrarrojos, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda, como son las ondas de radio. En la figura 1.1 se muestra a modo comparativo las diferentes longitudes de onda con objetos cotidianos.

Aunque la división de las bandas del espectro varía ligeramente según el autor, para su estudio se reparte principalmente en las bandas de la tabla 1.1.

Dentro de la ventana del infrarrojo, se clasifican las bandas de la tabla 1.2 según las aplicaciones que tienen lugar en cada región [2, 5]:

- *Infrarrojo cercano* (Near InfraRed (NIR)): abarca desde el inicio del espectro infrarrojo hasta longitudes de onda de $3\mu\text{m}$. Atendiendo a su amplia utilización en sistemas de co-

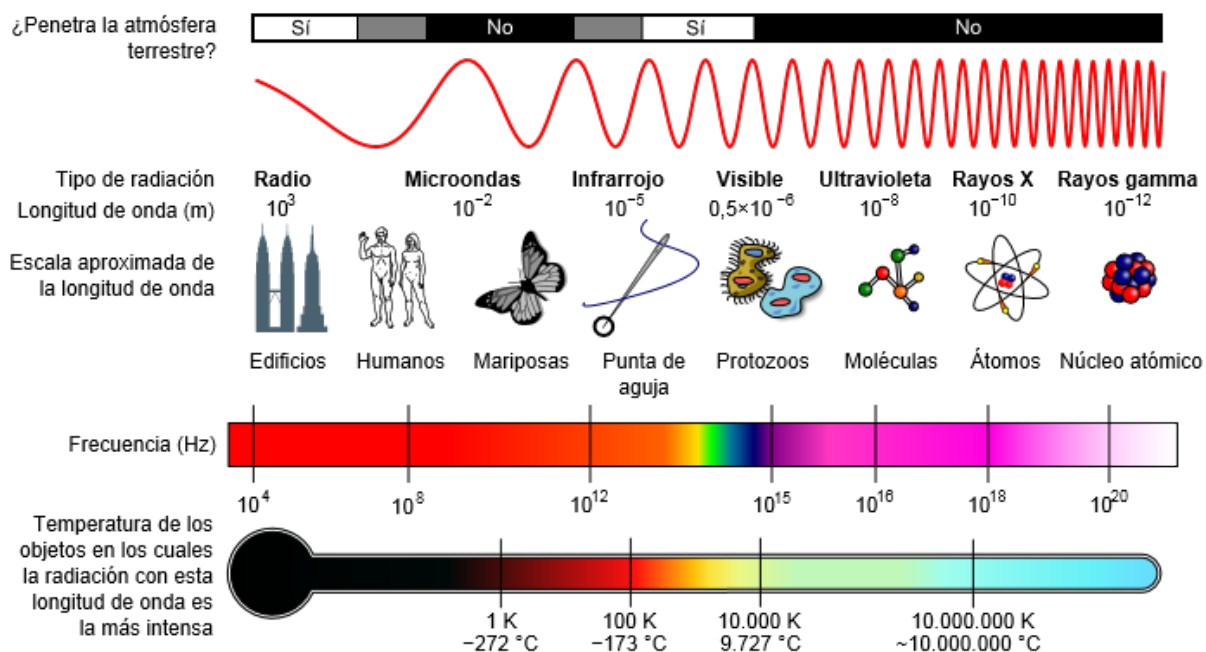


Figura 1.1: Espectro electromagnético

Nombre	Longitud de onda	Frecuencia	Energía del fotón
Rayos Gamma	< 0,01 nm	> 10EHz	124 keV – 300+ GeV
Rayos X	0,01nm – 10nm	30 EHz – 30 PHz	124 eV – 124 keV
Ultravioleta	10nm – 380nm	30 PHz – 790 THz	3,3 eV – 124 eV
Visible	380nm – 700nm	790 THz – 430 THz	1,7 eV – 3,3 eV
Infrarrojo	700nm – 1mm	430 THz – 300 GHz	1,24 meV – 1,7 eV
Microondas	1mm – 1m	300 GHz – 300 MHz	1,24 μ eV – 1,24 meV
Radio	1m – 100000km	300 GHz – 3 Hz	12,4 feV – 1,24 me

Tabla 1.1: Principales bandas del Espectro Electromagnético

municaciones, se podría además distinguir dos zonas dentro del infrarrojo cercano:

- El más común, de 0,75 hasta $1,1\mu\text{m}$, también llamado simplemente *NIR*. Esta región queda definida por el nivel de absorción del agua, siendo comúnmente usada en sistemas de transmisión basados en fibra óptica debido a las bajas pérdidas por atenuación del SiO_2 .
- *SWIR (Short-Wavelength InfraRed)*, de entre 1,1 hasta $3\mu\text{m}$. La absorción debida al agua se incrementa de forma significativa. En esta región se encuentra el rango de 1530 a 1560nm utilizada para comunicaciones de larga distancia.
- *Infrarrojo medio (Medium InfraRed (MIR))*: en la zona de 3 a $8\mu\text{m}$. Tienen especial importancia tanto los fenómenos debidos a la reflexión de la luz del sol como a la propia emisión de la superficie terrestre, por lo que resulta una región problemática del espectro infrarrojo.
- *Infrarrojo lejano (Far InfraRed (FIR))*: en la zona de 8 a $15\mu\text{m}$. En esta región se pueden encontrar aplicaciones de todo tipo, desde sistemas de detección de peatones hasta complejos osciladores de Terahercios usados en astronomía.
- *Infrarrojo extremo (Extreme InfraRed (XIR))*: para el resto del espectro.

Nombre	Longitud de onda
Infrarrojo Cercano	$0,75 - 3\mu\text{m}$
Infrarrojo Medio	$3 - 8\mu\text{m}$
Infrarrojo Lejano	$8\mu\text{m} - 15\mu\text{m}$
Infrarrojo Extremo	$15 - 1000\mu\text{m}$

Tabla 1.2: Bandas del Infrarrojo

Sin embargo, como también refleja la figura 1.1, las características de transmitancia de la atmósfera delimitarán regiones del espectro conocidas como *ventanas de transmisión* especialmente importantes en aplicaciones de teledetección. Esto lleva a que se suele identificar como *infrarrojo medio* o *MIR* al rango que abarca desde 3 a $5\mu\text{m}$, e infrarrojo térmico (Thermal InfraRed (TIR)) a la región entre 8 y $12\mu\text{m}$. Se pueden ver estas ventanas de transmisión en la figura 1.2.

La medida de radiación en el espectro visible se conoce como fotometría, pero como nuestro estudio se basa en el infrarrojo, nos referiremos a magnitudes radiométricas en todo momento.

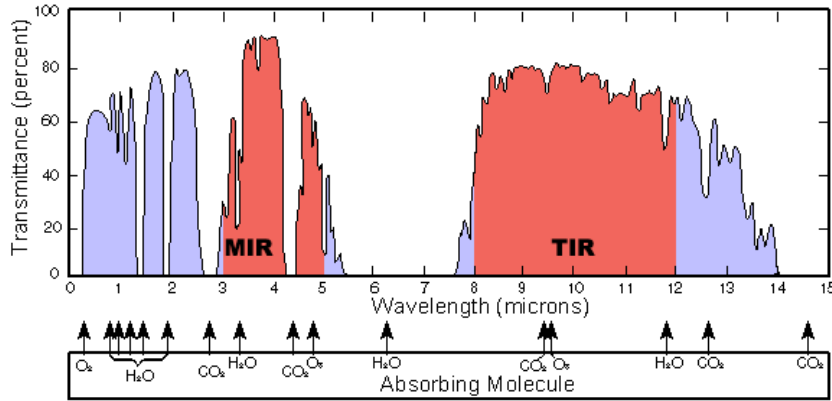


Figura 1.2: Ventanas de Transmisión en IR

1.2. Conceptos básicos de radiometría

La energía de las ondas electromagnéticas se denomina *energía radiante*, Q [J]. Esta magnitud describe la energía que radia una fuente en un intervalo de tiempo dado. Cuando se usan sensores infrarrojos, se utilizan detectores con respuesta a potencia incidente sobre ellos durante un tiempo de respuesta o *tiempo de integración* determinado. Esto hace que sea mucho más práctico utilizar como magnitud para caracterizar la radiación incidente el *flujo radiante* o *potencia radiante* Φ [W].

Esta potencia detectada depende de las características del detector, por lo que también se define una magnitud que representa la potencia incidente por unidad de área, denominada *densidad de flujo*. Esta densidad varía en función de que la potencia por unidad de área sea:

- potencia detectada: en cuyo caso se denominará *irradiancia* E [W/m²] o,
- potencia emitida: en cuyo caso se denominará *exitancia* M [W/m²].

La intensidad I W/sr de una fuente es la potencia irradiante por unidad de ángulo sólido.

El objetivo de los cálculos radiométricos suele ser:

- estimar la irradiancia que una determinada fuente, de exitancia conocida, produce sobre el detector, o bien
- conocer la exitancia de una fuente a partir de la irradiancia detectada.

Para realizar estos cálculos se define una nueva magnitud: la *radiancia*, L [W/m²sr]. Esta magnitud será la cuantificada en nuestro detector.

1.2.1. Definición de radiancia

La radiación que parte del emisor y llega al detector puede describirse mediante rayos de cierta intensidad asociada. De esta manera se puede decir que la radiancia será la medida de esta «intensidad de rayo» en un punto dado. Dada su dependencia en función del ángulo sólido y de la superficie del cuerpo radiante, resulta una magnitud muy útil para trabajar en el análisis de transferencia radiativa, como veremos en el capítulo 3.

Siendo exactos y fijándonos en la figura 1.3, siendo,

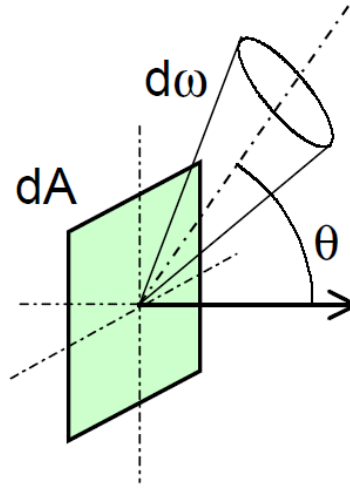


Figura 1.3: Definición de Radiancia

- dA un diferencial de superficie emisora situado en un punto (x, y) ,
- $d\Omega$ un ángulo sólido diferencial,
- θ el ángulo que forma la dirección con la normal
- $d^2\Phi$ la potencia total de los rayos que salen del elemento de superficie dentro del ángulo sólido considerado

Se define radiancia [5] como:

$$L(x, y, \theta, \phi) = \frac{d^2\Phi(x, y, \theta, \phi)}{d\Omega(\theta, \phi)dA(x, y) \cos \theta} \quad [W/m^2sr] \quad (1.1)$$

En esta definición, la notación $d^2\Phi$ indica que la potencia radiante (emitida o detectada) es diferenciada respecto al ángulo sólido y respecto al área proyectada (emisora o detectora). Por tanto, la potencia radiante (emitida o detectada) por una superficie será:

$$\Phi = \int_A \int_{\Omega} L \cos \theta dA d\Omega \quad (1.2)$$

Donde se integra todo el área de la superficie emisora o detectora y a la hemiesfera que comprendería todos los posibles ángulos sólidos emisores o detectores de radiación. Integrando sólo respecto al área de una fuente se obtiene su intensidad I (1.3) y si se integra sólo respecto a la hemisfera de la superficie emisora se obtiene su exitancia M (1.4):

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} = \int_A L \cos \theta dA \quad (1.3)$$

$$M = \frac{d\Phi}{dA_E} = \int_{\Omega} L \cos \theta d\Omega \quad (1.4)$$

Óptica y Detectores

Como los sistemas que se usarán en este proyecto son cámaras infrarrojas, los cálculos radiométricos de interés serán para sistemas ópticos que forman imágenes en el detector. Estos sistemas son los formados por *lentes*.

2.1. Lentes

Los parámetros fundamentales que caracterizan el sistema óptico más simple, formado por una lente, son los siguientes [3, 9]:

- *Distancia focal efectiva, f* : Se define como la distancia desde el centro de la lente al punto, denominado foco, donde convergen los rayos que entran paralelos al eje óptico del sistema
- *Pupila de entrada*: Está caracterizada por su diámetro D_{pe} . Es la superficie del sistema óptico que limita los rayos procedentes de un punto del eje óptico del espacio objeto que penetran en el sistema.
- *El número F , $F\#$* : determina la cantidad de flujo radiante que entra en el sistema y se define como el cociente entre la focal, f , y el diámetro de la pupila de entrada,

$$F\# = \frac{f}{D_{pe}} \quad (2.1)$$

Cuanto menor es el número $F\#$, mayor cantidad de radiación entra en el sistema.

- *Campo de Visión Instantáneo, IFOV*: Es el ángulo subtendido por cada detector del sistema

y viene dado por:

$$IFOV = \frac{t}{f} \quad (2.2)$$

siendo t el tamaño lineal del detector supuesto cuadrado.

- *Campo de Visión*, FOV: es naturalmente, $FOV = n \times IFOV$, donde n es el número de detectores del array.

Toda la energía que atravesará nuestro sistema óptico incidirá en el detector para ser cuantificada. En la siguiente sección se hablará de las figuras de mérito de estos dispositivos y de los tipos de detectores infrarrojos que existen en la actualidad.

2.2. Detectores

El detector será el encargado de transformar la radiación incidente en magnitudes electrónicas para ser procesadas posteriormente. El tipo de detector y el material empleado en su fabricación condicionarán en gran medida las características del sistema completo. La elección de estos dispositivos se basa de acuerdo a las especificaciones de ancho de banda, sensibilidad, resolución o coste del sistema de adquisición final.

Los primeros detectores de radiación infrarroja eran bolómetros, instrumentos que captan la radiación por el aumento de temperatura producido en un detector absorbente.

2.2.1. Parámetros y figuras de mérito de sensores infrarrojos

Los parámetros que definen la calidad de un detector son [5]:

Responsividad

Habitualmente se define como el cociente entre la señal de salida eléctrica (normalmente tensión) frente a la potencia asociada a la radiación incidente a la que se somete. Para detectores infrarrojos su expresión resulta:

$$R = \frac{V_{salida}}{P_{radiacion}} \quad [V/W] \quad (2.3)$$

Es importante diferenciar esta definición de la empleada en el ámbito optoelectrónico, en la que los detectores (fotodiodos, APD's,...) son caracterizados por la relación con su corriente de

salida, sin tener en cuenta el acondicionamiento externo, por lo que resulta una responsividad expresada en la forma A/W

Ruido

En este caso, con ruido nos referiremos al resto de señales eléctricas de procedencia distinta a la que realmente estamos interesados en sensar. Esta definición engloba tanto aquellas fuentes de ruido que se podrían evitar mediante una mejora del diseño (interferencias eléctricas, fluctuaciones de temperatura,...) como aquellas inherentes al sistema de detección (ruido térmico, de tipo *flicker*, de tipo impulsivo, de oscuridad,...).

Relación Señal a Ruido. SNR

Es la relación entre la señal eléctrica que se quiere medir, que representa información para nuestro sistema, y el resto de señales que estorban y son catalogadas como ruido.

$$SNR = \frac{S_{rms}}{R_{rms}} \quad (2.4)$$

Potencia de Ruido Equivalente. NEP

Se define como la potencia incidente necesaria para obtener una relación señal a ruido igual a 1 en el detector. Dicha potencia delimita la resolución del detector debida al ruido, ya que para potencias menores la señal no podría ser correctamente distinguida. Se expresa como:

$$NEP = \frac{P_{ruido}}{R} \quad (2.5)$$

donde R es la responsividad del detector.

Detectividad Específica. D^*

Puesto que la NEP depende (a través del ruido rms) tanto del ancho de banda como del área del detector, sería útil definir un parámetro independiente de dichos factores que sirva para la comparación de detectores. Por ello la detectividad específica se define como la inversa de la NEP normalizada al área del detector y al ancho de banda. Puesto que el ruido rms es proporcional a las raíces cuadradas de tanto el área del detector como del ancho de banda, la expresión resultante es

$$D^* = \frac{\sqrt{A_D \cdot \Delta f}}{NEP} \quad (2.6)$$

Como se puede ver, se utiliza la inversa de la NEP, de modo que mayores valores de D^* se corresponden a mejores detectores.

Rango dinámico

Se define como la relación entre las señales de menor y mayor orden que pueden estar presentes en el detector en un mismo instante de tiempo.

Tiempo de respuesta

Habitualmente se define como el tiempo necesario empleado por el detector para alcanzar el 96 % del valor final de su respuesta. Este tiempo podrá ser modelado en función de las características dinámicas de nuestro sistema. Por ejemplo, se pueden tener sistemas con características paso bajo o paso banda, y éstos podrán ser de primer o segundo orden o incluso de órdenes mayores.

2.2.2. Tipos de detectores

Una manera de clasificar los detectores es en función de si estos precisan o no de refrigeración o en función de la tecnología empleada. Según este último criterio, se clasifican los detectores en térmicos y fotónicos, pudiendo diferenciar distintos subtipos dentro de cada tipo.

Detectores Fotónicos

Este tipo de detectores basa su funcionamiento en la generación de portadores libres de carga empleando la energía de los fotones absorbidos. Dicha energía estará relacionada con la frecuencia de cada fotón, y el número de portadores generado dependerá de la energía de transición del material seleccionado. En este punto se diferencian a su vez los detectores extrínsecos, que introducen impurezas para reducir el ancho de *gap*, y los intrínsecos que emplean materiales sin impurezas.

Para los detectores fotónicos es muy importante la refrigeración, ya que el aumento de temperaturas hace que se incremente el ruido debido a la corriente de oscuridad generada en ausencia de radiación. Dentro de los detectores fotónicos, y limitándonos a aquellos de estado sólido, se

diferencian entre: fotoconductores, fotovoltaicos y pozos cuánticos. A continuación se describen cada uno de ellos.

Fotoconductores Los fotoconductores basan su funcionamiento en medir cambios en la resistencia del material frente a la llegada de potencia incidente. Cuando los fotones incidentes tienen una energía mayor que la del gap, generan pares electrón-hueco al ser absorbidos, aumentando por tanto la conductividad del material debido al incremento en el número de portadoras.

Este tipo de detectores requiere de polarización mediante un voltaje externo y se mide generalmente el voltaje generado en una resistencia en serie con la resistencia del detector.

Por último, la respuesta del fotoconductor no será plana espectralmente sino que no detectará aquellos fotones que incidan con energía menor que la del gap, y además disminuirá suavemente para energías mayores.

Fotovoltaicos Los detectores fotovoltaicos, también llamados fotodiodos, se construyen a partir de una unión P-N en un material semiconductor. Dicha unión P-N posee ya un voltaje inherente, por lo que no requiere de un voltaje, o corriente, de polarización externa.

La tensión generada por la iluminación viene dada por la siguiente expresión:

$$V_b = \frac{k \cdot T}{q} \ln \frac{n_n}{n_p} \quad (2.7)$$

donde:

- k es la constante de Boltzmann. $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$.
- T es la temperatura de la unión.
- q es la carga del electrón.
- n_n es la densidad de electrones libres en el material de tipo N.
- n_p es la densidad de electrones libres en el material de tipo P.

La llegada de fotones provocará cambios en las poblaciones de electrones y huecos. En [6] se encuentra el desarrollo matemático por el que la incidencia de un fotón provoca la siguiente diferencia de voltaje:

$$\frac{dV_b}{dE_f} \simeq \frac{k \cdot T \cdot \eta_q \cdot t_n \cdot (n_n + n_p)}{q \cdot d \cdot n_n \cdot n_p} \quad (2.8)$$

donde d es la profundidad del detector, y t_n es el tiempo de vida del portador. La anterior expresión nos permite relacionar el fotovoltaje inducido con la radiancia incidente.

Los detectores de tipo fotovoltaico ofrecen algunas ventajas sobre los fotoconductores, especialmente en calidad de responsividad y relación señal a ruido.

Pozos Cuánticos A diferencia de otros detectores fotónicos en los que las transiciones tienen lugar entre diferentes bandas, en este tipo de detectores las transiciones se producen entre sub-bandas encontradas dentro de una misma banda (la de conducción o la de valencia). Es decir, las transiciones se originan entre los distintos niveles energéticos ocasionados al apilar diferentes espesores de materiales semiconductores, cada uno de ellos con una energía de gap determinada.

Es de destacar que a pesar de ser dispositivos relativamente recientes, han sufrido un importante desarrollo en los últimos años. Como ejemplo de la velocidad de desarrollo, cabe destacar que apenas cuatro años después del primer detector se consiguió obtener una imagen infrarroja a partir de estos dispositivos.

Uno de los motivos de su rápido desarrollo se debe a que, al realizarse las transiciones entre sub-bandas, se requiere una menor energía incidente, lo que permite detectar radiación a longitudes de onda mayores. Además, dado que en este caso la diferencia energética depende del espesor del pozo, pueden realizarse diseños “a medida” que satisfagan determinadas características espectrales.

Detectores térmicos

Los detectores térmicos absorben la energía radiada que incide sobre ellos, lo que provoca cambios en su temperatura. Estos cambios de temperatura pueden dar lugar a señales electrónicas susceptibles de un acondicionamiento posterior.

Una de las características que hacen más atractivos a este tipo de detectores es que presentan la misma respuesta para todas las longitudes de onda, en contraste con los detectores fotónicos, en los que la energía incidente asociada a cada fotón deber ser mayor que la energía del gap. Además, se debe tener en cuenta que este tipo de detectores no precisa de refrigeración y por tanto su coste es relativamente menor al resto, por lo que su uso se ha extendido notablemente en los últimos años.

En contrapartida, sus tiempos de respuesta habituales se encuentran en el orden de milisegundos, por lo que son relativamente lentos, a lo que se tiene que añadir que su detectividad se

encuentra uno o dos órdenes de magnitud por debajo de los valores obtenidos en los detectores fotónicos [6].

Dentro de los detectores térmicos destacan los bolómetros y los denominados como piroeléctricos.

Bolómetros Un bolómetro es un instrumento que mide la cantidad total de radiación electromagnética a través de los cambios que se originan en la resistencia del material detector. Dichos cambios pueden ser expresados en función del incremento de temperatura, como se puede ver en la siguiente expresión [6]:

$$\Delta R_b = R_o \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (2.9)$$

siendo α el factor de dependencia de R con el incremento de temperatura.

Microbolómetros Un microbolómetro es un tipo de bolómetro empleado habitualmente como detector para termografía. Básicamente, consta de una rejilla generalmente de óxido de vanadio [14] o silicio amorfo [13]. La radiación infrarroja incidente dentro de una banda especificada de longitudes de onda calienta el sustrato y cambia su resistencia eléctrica. Este cambio puede ser transducido a una magnitud electrónica y posteriormente acondicionado. La rejilla del microbolómetro se encuentra comúnmente en dos tamaños, un array de 320×240 o de 160×120 , menos costoso que el anterior, pero cada día es más habitual encontrarnos con arrays de formatos mayores. Cuanto mayor es el array, más ancho es el campo visual que puede proporcionar bajo restricciones de resolución espacial.

Piroeléctricos Se trata de detectores relativamente nuevos que pueden ser fabricados de forma compacta. Son muy robustos y con ellos puede obtenerse tiempos de medida relativamente cortos. Su principio de funcionamiento se basa en un efecto que se manifiesta sobre materiales ferroeléctricos, según el cual la polarización en este tipo de materiales disminuye al aumentar la temperatura, hasta una temperatura denominada *de Curie* por encima de la cual la polarización es cero [6]. Si el ferroeléctrico se calienta, varía la polarización y por tanto la carga. Esta variación de carga ocasiona una intensidad eléctrica susceptible de ser medida. De aquí se desprende una característica fundamental de los detectores piroeléctricos, y es que sólo son capaces de medir variaciones de temperatura. Sus tiempos de respuesta son del orden de milisegundos y se utilizan sobre todo en sensores de presencia o de fuego.

Medida Cuantitativa en Infrarrojo

Los detectores generan una señal eléctrica analógica de bajo nivel, que posteriormente es filtrada y amplificada. Esta señal para ser tratada y extraer la información requiere de una cuantificación digital realizada con un conversor analógico-digital.

Los parámetros que más interesan de la electrónica del sistema son las salidas de datos de que dispone y el rango dinámico del conversor AD, ya que de él, entre otros factores, dependerá la resolución radiométrica de nuestro sistema.

Los *sistemas de acondicionamiento de señal* utilizan un control de ganancia automática (*Automatic Gain Control*, AGC) que evita la saturación del conversor y aprovecha todo el rango dinámico. Además suele realizar algunas correcciones en función de la escena y de los requisitos de la medida para mejorar el contraste de la imagen. Por este motivo, para realizar medidas radiométricas hay que evitar este tipo de configuraciones y realizar en todo caso una *conversión lineal y de ganancia estática y conocida*.

En consecuencia, es posible y necesario realizar una calibración radiométrica previa de nuestros dispositivos. Esto consiste básicamente en relacionar la *radiancia del cuerpo negro* con la respuesta digital del sensor. Dicha radiancia atraviesa un camino óptico en el cual sufre pérdidas y se añaden numerosas fuentes de ruido que dependen, como se vio en 1.1, de la ventana de transmisión empleada. A continuación se describen los elementos que caracterizan la ecuación de transferencia radiativa y caracterizan nuestro canal.

3.1. Proceso de Transferencia Radiativa

La radiancia detectada por un sistema requiere conocer el proceso de transferencia radiativa entre el blanco y el sensor. Dicho proceso viene determinado por la siguiente ecuación [5]:

$$L_D = \tau_{opt} \cdot \left(\tau_{atm} \cdot \left(L_{obj}^e + L_{amb}^r + L_{sol}^r + L_{sol}^{disp+r} \right) + L_{atm}^e + L_{sol}^{dis} \right) + (1 - \tau_{opt}) \cdot L_{opt} \quad (3.1)$$

donde,

- τ_{opt} : Transmitancia de la óptica.
- τ_{atm} : Transmitancia atmosférica.
- L_{obj}^e : Radiancia emitida por el objeto.
- L_{amb}^r : Radiancia reflejada por el ambiente.
- L_{sol}^r : Radiancia reflejada por cualquier fuente externa, que por claridad se identifica como Sol.
- L_{sol}^{disp+r} : Radiancia externa reflejada y dispersada por la atmósfera.
- L_{atm}^e : Radiancia emitida por la atmósfera.
- L_{sol}^{dis} : Radiancia externa dispersada por la atmósfera.
- L_{opt} : Radiancia emitida por la óptica.

En las condiciones de medida de nuestro sistema, se considera el canal como el espacio que existe entre el objeto de medida y la cámara, sin tener en cuenta el efecto de la óptica que será corregido durante la calibración. Además en las circunstancias de medida de este proyecto se desprecian las componentes reflejadas y dispersadas de fuentes externas, por lo que la expresión 3.1 queda en [5]:

$$L_{sist} = \tau_{atm} \cdot (L_{obj}^e + L_{amb}^r) + L_{atm}^e \quad (3.2)$$

En la figura 3.1 se puede ver gráficamente las diferentes radiancias en el camino emisor-cámara, siendo L_{sist} la contribución de de todas ellas. En la siguiente sección se explica cuál es la relación entre la temperatura del objeto (en la figura T_{obj}) y su radiancia (L_{obj}^e).

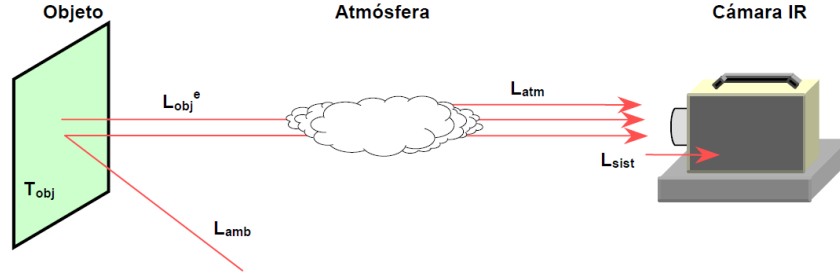


Figura 3.1: Ejemplo sencillo de teledetección IR

3.2. Calibración y Corrección de No-Uniformidad

La radiancia emitida por el objeto L_{obj}^e depende de la temperatura del objeto T_{obj} y de su emisividad, ϵ_{obj} . Para la calibración se utilizan cuerpos negros, es decir, fuentes con emisividad $\epsilon \approx 1$. Denotando $L^{CN}(T)$ a la radiancia emitida por un cuerpo negro a la temperatura T , se tiene que la radiancia emitida por un cuerpo a temperatura T_{obj} estará dada por la expresión [5]:

$$L_{obj}^e = \epsilon_{obj} \cdot L^{CN}(T_{obj}) \quad (3.3)$$

Se describe la radiación del cuerpo negro a través de la *Ley de Planck del cuerpo negro*, que especifica que la emitancia espectral es [5]:

$$M_{CN}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]} \quad (3.4)$$

donde,

- λ representa la longitud de onda en μm .
- T es la temperatura absoluta (K) del cuerpo.
- $c_1 = 3,7418 \times 10^4 \text{ W} \cdot \mu m^4 / cm^2$.
- $c_2 = 1,4388 \times 10^4 \mu m \cdot K$.

Además, como los cuerpos negros pueden ser considerados como fuentes lambertianas, es decir, fuentes en las que se produce una disminución de la intensidad con el ángulo respecto a la incidencia normal en la que se obtiene el valor máximo según la expresión:

$$I(\theta) = I_N \cos \theta \quad [W/sr] \quad (3.5)$$

Por lo que el CN, a partir de la expresión 1.1, tiene radiancia independiente del ángulo de emisión, lo que permite expresarla de forma proporcional a su emitancia según:

$$L = \frac{M}{\pi} \quad [W/m^2 \cdot sr] \quad (3.6)$$

De esta manera, se determina con precisión la *radiancia del Cuerpo Negro* L_{CN} para la calibración:

$$L_{CN}(\lambda, T) = \frac{2h}{\lambda^3 c^2} \frac{1}{e^{\frac{h}{\lambda k T}} - 1} \quad (3.7)$$

La radiancia ambiente también es habitual considerarla como un cuerpo negro a T_{amb} . Así, con los parámetros de transmitancia conocidos y las aproximaciones explicadas, queda completada la radiancia teórica en el detector según 3.2.

El detector de la cámara, en un escenario ideal y en un modo de funcionamiento lineal, expresa la radiancia detectada como:

$$ND = Ganancia \times L_{CN}(T_{obj}) + Offset \quad (3.8)$$

Donde los parámetros de *Ganancia* y *Offset* son los parámetros que deberán ser obtenidos en el procedimiento de calibración. En estos parámetros estarán incluidas la transmitancia de la óptica y la emisión propia de la cámara.

De esta manera, a partir de 3.2 se obtiene la expresión deseada para la calibración del sistema:

$$L_{CN}(T_{obj}) = \frac{ND - Offset}{Ganancia} \quad (3.9)$$

y bastará con realizar la correspondiente regresión lineal en base a varias medidas del CN a diferentes T_{obj} para obtener los parámetros de interés de la cámara en una determinada configuración del sensor: Offset y Ganancia.

3.2.1. Corrección de No-Uniformidad

La respuesta de cada detector en la matriz del sensor de una cámara infrarroja ante una misma radiación incidente no es uniforme. A continuación se describen las causas de estas diferencias debidas a efectos electrónicos y ópticos y que resultan en un ruido de patrón sobre la imagen. Posteriormente se explica la corrección de tal efecto, que se conoce como *Corrección de No-Uniformidad* (NUC) y es fácilmente corregible [8]

Ruido electrónico. Este ruido es debido a dos causas:

1. En primer lugar, al *ruido de patrón fijo* (*fixed pattern noise, FPN*), relativo al detector. Se trata de la variación píxel a píxel de la corriente de oscuridad de los detectores. El FPN se debe a pequeñas diferencias en el tamaño de los detectores, densidad de dopaje y partículas parásitas en el sustrato atrapadas en el proceso de fabricación.
2. Por otro lado, debido a la *no-uniformidad de la fotorespuesta* (*photoresponse non-uniformity, PRNU*). Es la variación de las responsividades de los detectores y se aprecia fácilmente cuando se ilumina el FPA y se debe a las diferencias en el tamaño del detector, respuesta espectral y grosor del revestimiento [8].

Ruido óptico. Además de estos ruidos propios del detector, con la NUC se corrige también el efecto de viñeteo, propio de la óptica, que consiste en un ensombrecimiento producido por la apertura de el objetivo sobre el FPA. Se visualiza claramente en la figura 3.2a.

El ruido de patrón puede ser aditivo o multiplicativo, también llamados *independientes de señal* o *dependientes de señal* respectivamente. En arrays con corrientes de oscuridad diferentes, las potencias de ruido son aditivas y arrays con diferentes responsividades producen ruido multiplicativo.

El ruido de patrón fijo se puede minimizar significativamente con software a través de tablas de búsqueda. Consiste básicamente en uniformizar la salida de cada detector para diferentes valores de radiancia incidente, es decir una normalización de ganancia y/o offset detector a detector como se verá más adelante. Los resultados de esta corrección sobre una imagen termográfica de un soldador de estaño se pueden apreciar en la figura 3.2.

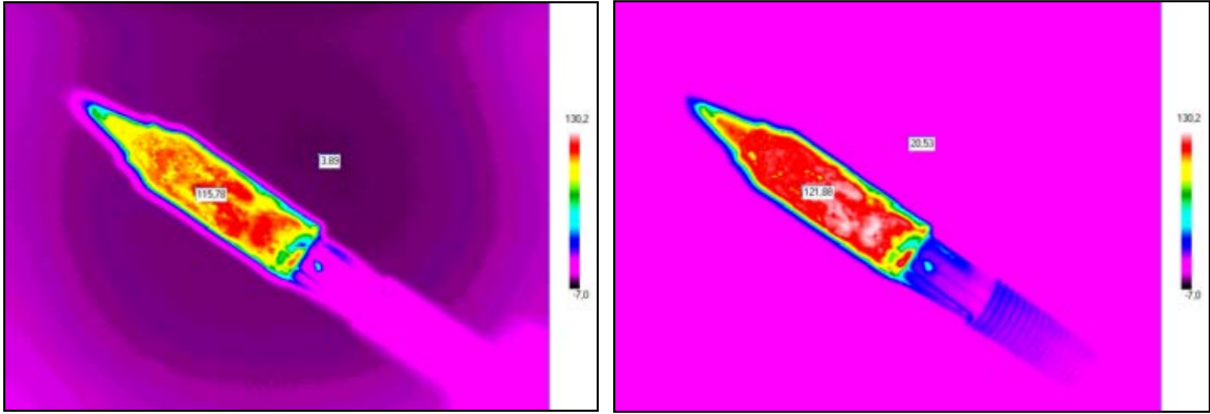
Estas radiancias de normalización son llamadas *puntos de calibración*, *referencias de temperatura* o simplemente *puntos*.

Corrección a un punto

Bajo la asunción de que la respuesta característica de un detector puede ser descrita como una ecuación lineal, hay dos parámetros que pueden ser corregidos para cada uno de ellos:

$$Y_{i,j}(T) = g_{i,j} \cdot \phi + o_{i,j} \quad (3.10)$$

donde,



(a) Imagen termográfica sin NUC

(b) Imagen termográfica con NUC

Figura 3.2: Comparativa de imagen antes y después de realizar la NUC

- $Y(T_{i,j})$ es la respuesta del detector en la posición i,j a la radiación infrarroja correspondiente a una temperatura $T_{i,j}$
- $g_{i,j}$ es la ganancia de este detector
- $o_{i,j}$ es el offset

La corrección más común es una aproximación que usa el *shutter* mecánico de la cámara, que es disparado periódicamente introduciéndose en frente de la superficie del FPA. Se denomina *corrección a un punto* porque puede corregir sólo el parámetro de offset.

Se asume que todos los detectores tienen valores de ganancia corregidos en fábrica, y que no hay por tanto necesidad de repetir esta corrección. Sin embargo, en [15] se ha demostrado que en la práctica el parámetro de ganancia también cambia con el tiempo debido a el envejecimiento de los detectores, como a polvo o suciedad que puede aparecer en la superficie de las lentes y FPAs.

Corrección a dos puntos

El método de *corrección a dos puntos* soluciona el problema anterior, corrigiendo la no-uniformidad de offset y ganancia. Esto principalmente consiste en realizar la medida de un cuerpo frío (punto frío) y otro cuerpo caliente (cuerpo caliente). La medida de la fuente fría junto con la caliente permitirá calcular la recta (pendiente y offset) de respuesta para cada detector y realizar la uniformización de estos dos parámetros en el conjunto de detectores del array.

La principal ventaja de este método es que ya no es necesario interrumpir la visualización de la imagen durante la corrección.

3.3. Imagen multiespectral e hiperspectral

La instrumentación infrarroja se ha dividido tradicionalmente en dos clases: los *sistemas de imagen* y los *sistemas espectrorradiométricos*, con resolución espectral. La evolución natural de la instrumentación infrarroja se ha dirigido, por una parte, a la mejora de las resoluciones espacial y espectral en ambas clases y, por otra parte, la implementación de nuevos instrumentos que posean, simultáneamente, resolución espectral y espacial: los denominados **espectrómetros de imagen**.

La existencia de esta instrumentación, combinada con los avances llevados a cabo en el procesamiento y almacenamiento de datos, ha generado una nueva y poderosa herramienta para el estudio de la escena IR: *la espectrometría de imagen*

El espectrómetro de imagen más sencillo posible es un sistema biespectral con solo dos bandas. Sin embargo, los espectrómetros de imagen han evolucionado hacia la incorporación de bandas más estrechas y en mayor número dentro de las ventanas atmosféricas. Las bandas adicionales, tienen gran utilidad práctica en el estudio de problemas específicos.

Los **sistemas multiespectrales** (multispectral scanners) utilizan varias bandas, inicialmente en el visible y el infrarrojo próximo (NIR), y que posteriormente se han extendido al IR medio y térmico. Se han utilizado ampliamente, aerotransportados y embarcados en satélite (Landast, NOAA, SPOT, EOS, etc), en aplicaciones de teledetección de recursos, estudio de la superficie terrestre y meteorológicas.

La posibilidad de conseguir mejor resolución espectral y mayor número de bandas, propició la aparición de **sistemas ultraespectrales** con una resolución de $0,1\mu m$, e **hiperespectrales** que llegan a una resolución de $0,01\mu m$ y pueden tener cientos de bandas. Estos sistemas de alta resolución, y cuyas bandas son contiguas, son a los que comúnmente se refiere la literatura actual con el término *espectrómetros de imagen*, aunque estrictamente puede llamarse así a cualquier sistema de imagen con más de una banda que cumpla los requisitos de correlación espacial, temporal y radiométrica que mencionados en la introducción.

Los métodos utilizados para dotar a los espectrómetros de imagen de resolución espectral son muy variados y han ido evolucionando y ganando en complejidad junto con los sistemas de

imagen. Se han utilizado:

- **Ruedas portafiltros** con filtros interferenciales paso banda en longitudes de onda discretas.
- **Filtros interferenciales circulares variables** en donde la banda espectral que se deja pasar es sintonizable.
- **Sistemas dispersivos** como prismas de Ge, redes de difracción, interferómetros de Michelson o de Fabry-Perot, óptica difractiva.

Un ejemplo de aplicación de estos sistemas es nuestro sistema de análisis de materiales en ensayo a fuego, donde una de las cámaras infrarrojas requiere una sintonización espectral óptima para la correcta medida de la temperatura, como se explicará más adelante.

Parte II

SISTEMA DE ADQUISICIÓN DUAL

En esta parte se describe el sistema de adquisición desde la descripción de la cámaras de medida en el capítulo 4 hasta la implementación del software final en el capítulo 7. Durante el proceso de diseño e implementación se han resuelto los siguientes problemas:

- En el capítulo 5 se describe el programa en base a los objetivos. Se establece el algoritmo de funcionamiento y se describe la interfaz gráfica usuario. Así mismo, se resuelve el problema de sincronismo entre dos cámaras distintas y la gestión eficiente de memoria.
- Los requisitos de diseño llevaron a la implementación de una librería de control en C++ para la cámara Sensia SIS 384.L (capítulo 6). El desarrollo de este código permite la posterior integración de sus funciones en *LabVIEW* (sección 7.2) y deja abierto un amplio abanico de posibilidades para desarrollos futuros. Además, su estructura de clases por capas establece una sólida base para ser ampliada con nuevas funciones de control.
- Además de la librería de implementación propia, se explicará el uso de las librerías de desarrollo de *Flir* e *ImperX* en las secciones 7.3 y 7.4.
- Se describirá el procedimiento seguido para integrar todas estas herramientas en el entorno de desarrollo de *LabVIEW* en sus apartados correspondientes.

Finalmente, en la última sección, se describe el manejo de la interfaz de usuario del programa implementado.

Instrumentación empleada

4.1. FLIR A325: Cara fría

Para la captura de imágenes radiométricas en la cara fría, se usará la cámara *FLIR A325*, cuyas especificaciones de interés se muestran en la tabla [4.1](#).



Figura 4.1: Cámara FLIR A325

4.2. Sensia SIS 384.L Uncooled: Cara caliente

Para la cara caliente, se empleará la cámara *Sensia SIS 384.L Uncooled* que se puede observar en las figuras [4.2](#) y [9.6](#). Se trata de otra cámara de microbolómetros no refrigerados, más moderna, con una resolución espacial mayor, y con una óptica de distancia focal mayor que permitirá colocar la cámara en una posición más lejana de la cara caliente de la probeta y del quemador, además

Cámara FLIR A325		
Detector	Tipo de Detector	Microbolómetros no refrigerado
	Banda	7,5 a 13,0 μm
	Tamaño del array	320 \times 240 píxeles
	Pixel pitch	25 μm
	Tasa de refresco	60Hz
	Constante de tiempo	12ms
	Sensibilidad térmica (NETD)	70mK @ +30°C
Óptica	Campo de visión (FOV)	25° \times 19°
	Distancia mínima de enfoque	0,4m
	Distancia focal	18mm
	Resolución espacial (IFOV)	1,36mrad
	Apertura (Número F)	F1,3
	Enfoque	Automático o manual (motor integrado)
Características eléctricas y Comunicación	Interfaz de Imagen y Control	Gigabit Ethernet
	Alimentación	12VDC

Tabla 4.1: Especificaciones cámara FLIR A325

de poder incorporarle filtros que serán necesarios para evitar que la llama del quemador, cuando se use en quemas, impida observar la probeta de estudio.

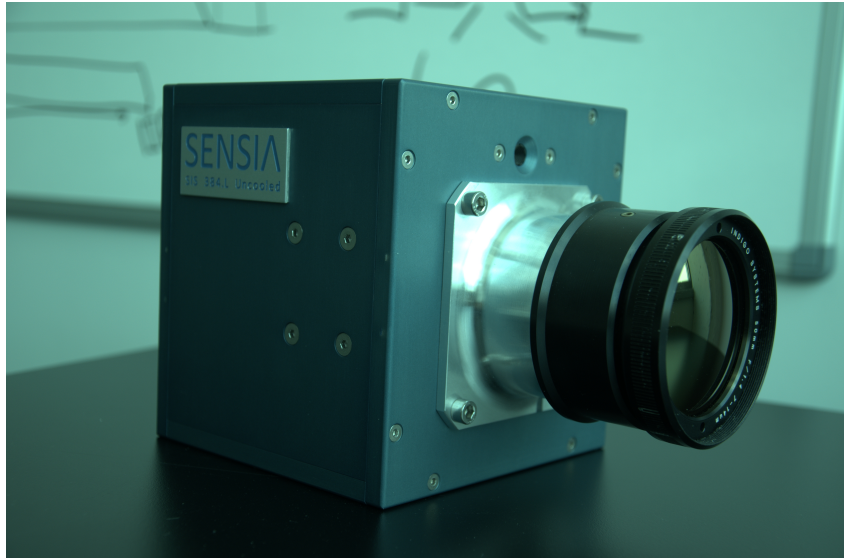


Figura 4.2: Vista de perfil Cámara Sensia SIS 384.L Uncooled

Sus especificaciones de interés se muestran en la tabla 4.2.

Otra funcionalidad que aporta esta cámara, que aunque no es de provecho para este proyecto sí puede serlo para otros futuros, es que incorpora una pequeña cámara de espectro visible. Se puede encontrar en la imagen de la figura 4.3a, sobre la óptica de la cámara. Esto será muy útil por ejemplo para detección de gases, donde la cámara infrarroja puede ver los gases pero es difícil ubicarlos en la zona visible cuando se encuentran en determinados entornos. Mediante algoritmos de fusión de imágenes se puede ver el «gas invisible» sobre la imagen visible del fondo.

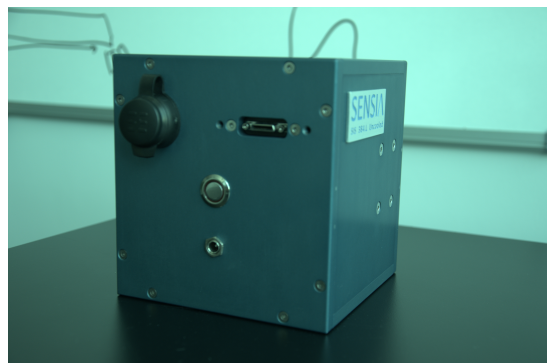
En el capítulo 6 nos referiremos al sensor que integra esta cámara como *SCD Bird*, ya que es este fabricante el que aporta las especificaciones del protocolo de comunicaciones que se ha programado.

Cámara Sensia SIS 384.L Uncooled		
Detector	Modelo de sensor	SCD BIRD 384 IR
	Tipo de detector	Microbolómetros no refrigerado
	Tamaño de array	384×288 pixeles
	Banda	8 a $14\mu m$
	Pixel pitch	$25\mu m$
	Tasa de refresco	$60Hz$
	Sensibilidad Térmica (NETD)	$<50mK$
Óptica	Campo de visión (FOV)	$18,2^\circ \times 13,5^\circ$
	Distancia focal	$50mm$
	Resolución espacial (IFOV)	$0,82mrad$
	Apertura (Número F)	$F1,4$
	Enfoque	Manual
Características eléctricas y Comunicación	Interfaz de Imagen	<i>CameraLink</i>
	Interfaz de control	RS232
	Alimentación	$5V$

Tabla 4.2: Especificaciones cámara Sensia SIS 384.L



(a) Vista Frontal



(b) Vista Trasera

Figura 4.3: Vistas frontal y trasera de la cámara Sensia SIS 384.L Uncooled

Capítulo 5

Resumen de funcionamiento

En este capítulo se explica cómo funciona el software implementado. En la figura 5.1 se encuentra el diagrama de flujo general del programa. Como se puede apreciar, antes del inicio del programa, es necesario pasarle como parámetros lo que se ha denominado «*Modo de Funcionamiento*».

El programa puede funcionar en tres «modos» para aportarle mayor versatilidad y poder emplearse en distintas situaciones:

- Modo «*A325*»: Sólo inicializa, visualiza y captura de la cámara Flir A325.
- Modo «*Sensia Cam*»: Sólo inicializa, visualiza y captura de la cámara Sensia SIS 384.L.
- Modo «*Dual*»: Inicializa, sincroniza, visualiza y captura ambas cámaras. Este modo será el principal y estará activo por defecto.

Los tres modos comparten las mismas funcionalidades salvo la sincronización de imágenes en el caso dual, donde se tiene funcionando las dos cámaras. Por comodidad en este texto, vamos a ponernos en el caso de funcionamiento dual y se hablará de dos cámaras y dos flujos de imágenes sincronizados. Se puede extrapolar el funcionamiento de los otros dos modos de cámara única a partir de esta explicación, pensando en un sólo flujo de datos y obviando la sincronización al tener un sólo flujo de frecuencia de imágenes constante.

Como apoyo a la lectura, se ha incluido en el apéndice B una captura del Panel Frontal donde se encuentran todos los controles e indicadores referidos a continuación.

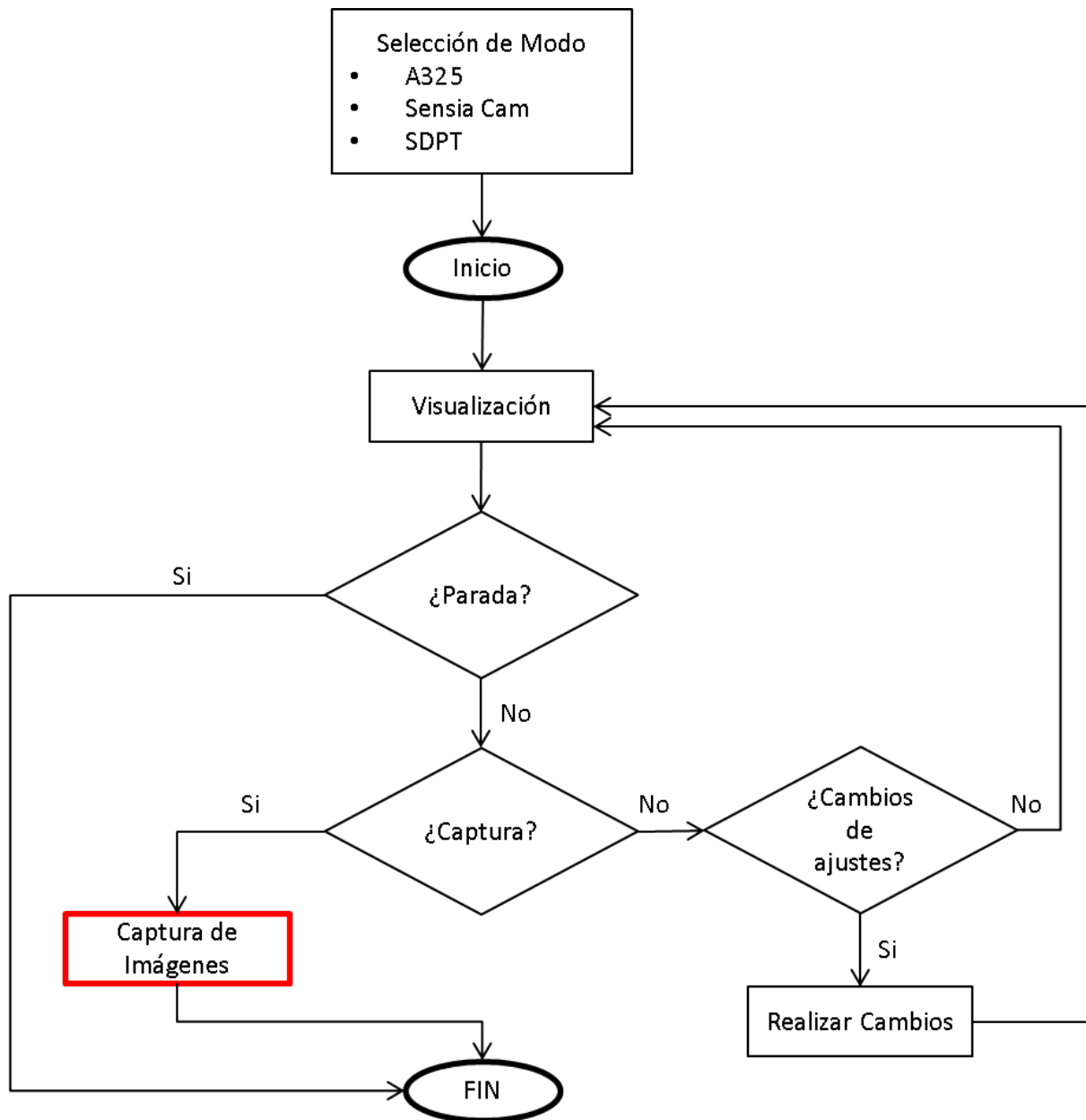


Figura 5.1: Diagrama de flujo general

5.1. Inicio

En el arranque del programa se inicializan las cámaras con la configuración por defecto. Es importante tener conectadas todas las interfaces de los dispositivos (ethernet de la A325, serie de la Sensia para el control, y *CameraLink* de la Sensia para la adquisición) y haber elegido correctamente el puerto de comunicaciones serie de Windows en el Panel Frontal. En caso de cualquier fallo de conexión en una de estas interfaces, se obtendrá un mensaje de error que informará qué interfaz es la que está fallando y posteriormente se cerrará el programa.

La configuración por defecto del sistema dual es:

- Ganancia por defecto de la cámara Sensia: Se inicializa con la configuración por defecto almacenada en su memoria *Flash*, que puede ser modificada con otros programas externos además de con el nuestro. Si no se realizan cambios de ganancia durante la ejecución, esta será la configuración establecida para el sensor durante la ejecución.
- Shutter abierto en la cámara Sensia.
- Última posición del motor de enfoque de la A325: La cámara conservará la última posición de enfoque que tuvo en el último uso. Deberá ser enfocada durante el estado de «visualización».
- Imágenes por segundo (Frames Per Second, FPS): Inicializado a 0. Deberá ser configurado en cualquier momento antes de dar al botón «Adquirir».
- Número de imágenes (Número Frames): También inicializado a 0 y deberá ser elegido junto con el parámetro anterior.

Resulta evidente que una combinación de FPS y Número de Frames da lugar a un tiempo de captura determinado, y se mostrará en segundos en el indicador «Tiempo (s)» durante el estado de visualización.

5.2. Visualización

En el estado de Visualización, con ayuda de las dos ventanas emergentes de imagen en directo (una para cada cámara), se debe ajustar todo el sistema para una correcta adquisición. Estos ajustes son:

- Una correcta colocación de las cámaras para que se visualice completamente la probeta, y suficientemente lejos de las fuentes de calor para proteger los dispositivos.
- Enfoque manual de la cámara Sensia, que no dispone de motor de enfoque.
- Enfoque desde el Panel Frontal de la A325. Estos controles se pueden encontrar en el subpanel «Enfoque FLIR A325».
- Realizar las NUC si fuera necesario.
- Elección de parámetros FPS y Número de Frames para cada una de las fases, en base al tiempo necesario para el estudio térmico de la probeta, que suele ser resultado de una simulación previa al experimento.

Se pasará al estado de «Adquisición» al ser pulsado el botón homónimo. Si es pulsado el botón de «Parada», el programa dejará de visualizar imágenes y se cerrará.

5.3. Adquisición

El estado de adquisición es el más crítico. Se debe realizar una gestión de memoria óptima y evitar escribir en disco para garantizar que la adquisición se realice a la tasa deseada y no haya problemas de falta de memoria. En un estudio de resistencia a fuego de materiales, normalmente las probetas acaban destruyéndose tras el experimento, y dependiendo del tipo de material objeto de estudio, pueden llegar a ser muy caras. Un fallo en la etapa de adquisición puede arruinar el experimento con el consiguiente retraso para la preparación de más probetas y una importante pérdida para el presupuesto del proyecto.

La tasa máxima de adquisición de imágenes limitada por las características de ambas cámaras es de 60Hz como se vió en el capítulo 4. A pesar de este límite, existen numerosos retardos que introduce el sistema de transmisión y de procesado. El efecto de estos retardos se podrá ver en la parte III, donde en base a los resultados experimentales se resumen los límites de funcionamiento de nuestro sistema. No obstante, se recomienda no usar una tasa de adquisición superior a la requerida para el estudio (en la puesta en marcha del sistema fue suficiente una tasa de adquisición de 6Hz en la primera y tercera fase), para evitar que el planificador del sistema operativo active procesos y pueda deteriorar el óptimo funcionamiento de esta etapa.

Durante la adquisición, se activa una barra de progreso que indicará cualitativamente el tiempo transcurrido o que falta para la finalización. Así mismo, se puede cancelar la toma abruptamente pulsando el botón de «Parada».

Una vez finalizada una adquisición con naturalidad, se abrirá una ventana donde se pondrá el nombre del archivo donde se quiera guardar los datos en formato «FITS» [1]. No se deberá poner un nombre distinto para las secuencias de imágenes de cada cámara, ya que el programa pondrá el sufijo «-A325.fts» para la secuencia adquirida de la A325 y «-SCD.fts» para la secuencia de la cámara Sensia.

La configuración de tiempo real de *LabVIEW* usada en este proyecto, dado que se usan ciclos temporizados con un reloj de 1KHz, garantiza una pérdida de sincronismo máxima de la misma imagen entre cámaras de 1ms. Sin embargo, como la tasa de adquisición de cada cámara es de 60Hz y los sensores no están sincronizados, el retardo máximo entre imágenes puede llegar a ser de un ciclo de captura de los sensores: 16,66ms.

5.4. Cambios de ajustes

En cualquier momento durante el estado de «Visualización» se pueden realizar los siguientes cambios de ajustes:

- Enfoque de la A325.
- Cambio de ganancia de la cámara Sensia.
- Abrir y cerrar el Shutter.
- Cambiar los «Parámetros de Adquisición».

En el siguiente capítulo y en 7.2, se explica cómo se ha elaborado e incorporado el software de control de la cámara Sensia en nuestro programa de *LabVIEW* para permitir realizar estos ajustes. En las secciones 7.4 y 7.3 se explicará la necesidad de usar algunas librerías propietarias para el resto de operaciones con las cámaras.

Software de control para la cámara Sensia

Siguiendo las especificaciones del fabricante[12], se ha programado la librería necesaria en C++ con la intención de importar las funciones posteriormente en *LabVIEW* a través de una librería precompilada o DLL. A continuación, se detalla la programación de esta librería y posteriormente, la correspondiente adaptación para la integración en *LabVIEW*. En la misma sección se explicará por qué es necesaria esta modificación.

El protocolo de comunicaciones se monta sobre el Transmisor/Receptor Universal Asíncrono (UART) (ver figura 6.1) del puerto serie del ordenador, con unos niveles de salida bajo standard RS-232. El sistema está adaptado para ser usado en equipos portátiles modernos que no disponen de conectores de puerto serie por su volumen. Por esta razón, la cámara lleva integrada una placa conversora USB-RS232 que a efectos prácticos, resulta transparente para la programación. Es decir, se dispone de un puerto serie virtual que simplificará la programación.

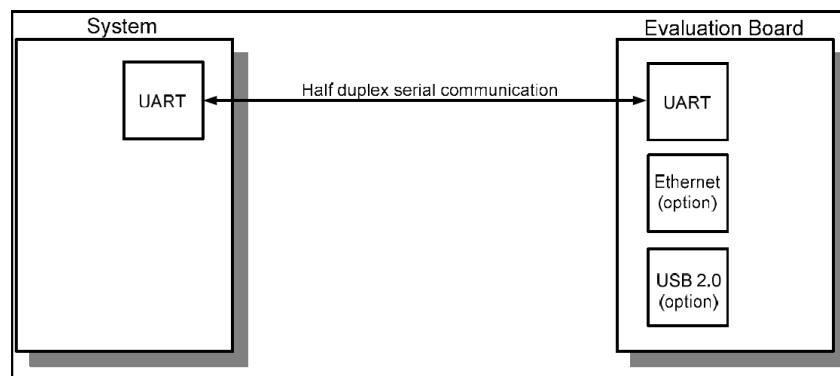


Figura 6.1: Comunicación PC a placa de comunicaciones SCD BIRD

6.1. Descripción de la comunicación UART

- Por cada byte transmitido, se manda un bit de comienzo y uno de parada. Es decir, un total de 10 bits.
- Se emplea una tasa de 115200 bps.
- Los comandos de la comunicación son de tamaño variable dependiendo del tipo de trama mandado.
- El retardo típico entre el comando transmitido y la generación de respuesta, ACK o fallo, es de *300ms*.
- Si el comando recibido contiene un error o un parámetro ilegal, se ignora el comando y se manda una respuesta de fallo detallada.
- Si hay más de un byte para un campo, como suele ocurrir en la mayoría de los casos, estos se ordenan en orden LSB-MSB (Little Endian).

6.2. Estructura e implementación de la API en C++

Nuestra API maneja tanto el protocolo de comunicaciones del SCD Bird como el puerto serie del sistema operativo (Windows). Aunque pueda resultar evidente, se describirán brevemente las funciones de la API de Windows que permiten manejar el puerto serie con la configuración deseada para el proyecto.

6.2.1. Capa física: Clase *CComport*

Constructor `CComport(LPCSTR sCom, LPCSTR sBaud)`

Al constructor de la clase se le pasan los parámetros:

- `LPCSTR sCom`: Un string que indica el puerto de Windows a manejar. Por ejemplo `"\\\\.\\COM1"`.
- `LPCSTR sBaud`: La tasa binaria que se va a utilizar. En nuestro caso `"115200"`.

El constructor no inicializa el puerto. Para ello es necesario utilizar el método `OpenComm` antes de enviar o recibir datos.

Métodos

- `HANDLE OpenComm(DWORD dwInQueue, DWORD dwOutQueue)`

Devuelve el manejador del puerto serie. En caso de error devuelve un manejador inválido e imprime en pantalla el mensaje de error. Recibe como parámetros:

- `DWORD dwInQueue`: tamaño de la cola de recepción
- `DWORD dwOutQueue`: tamaño de la cola de transmisión

- `void CloseComm(HANDLE & hCom)`

Cierra el puerto serie. Recibe como parámetro el manejador del puerto.

- `BOOL ResetComm(HANDLE hCom, LPCSTR sBaud)`

Resetea la configuración del puerto. Devuelve 0 si hay error o 1 en caso contrario. Recibe como parámetros:

- `HANDLE hCom`: El manejador del puerto.
- `LPCSTR sBaud`: La nueva tasa binaria.

- `BOOL SendBuf2Comm(HANDLE hCom, BYTE * buf, DWORD dwSize, DWORD &dwSent)`

Transmite el buffer al puerto serie. Devuelve 0 si hay error o 1 en caso contrario. Recibe como parámetros:

- `HANDLE hCom`: Manejador del puerto
- `BYTE * buf`: Puntero al buffer de datos
- `DWORD dwSize`: Tamaño de los datos a transmitir
- `DWORD &dwSent`: Puntero para devolver el número de datos transmitidos. `dwSize` y `dwSent` deben coincidir si la transmisión se ha realizado satisfactoriamente.

- `BOOL ReadComm2Buf(HANDLE hCom, BYTE * buf, DWORD dwSize, DWORD &dwReaded, DWORD timeout)`

Recibe el buffer del puerto serie. Devuelve 0 si hay error o 1 en caso contrario. Recibe como parámetros:

- `HANDLE hCom`: Manejador del puerto
- `BYTE * buf`: Puntero al buffer de datos

- **DWORD dwSize:** Tamaño de los datos a recibir
- **DWORD &dwReaded:** Puntero para devolver el número de datos recibidos. dwSize y dwReaded deben coincidir si la transmisión se ha realizado satisfactoriamente.
- **DWORD timeout:** El tiempo máximo para esperar la recepción de datos.

6.2.2. Protocolo de Comunicaciones SCD Bird

Como se ha dicho anteriormente, los objetivos son disponer de una API en C++ que permita comunicar algunos comandos de control con fin de poder cambiar las configuraciones de ganancia del sensor de la cámara y controlar el shutter de una manera rápida y cómoda desde el mismo panel de control de *LabVIEW*. Antes de describir las funciones de la capa de enlace, debemos conocer la estructura de trama del protocolo de comunicaciones del sensor integrado en la cámara, el *SCD Bird* [12].

Un comando del protocolo de control tiene el formato genérico mostrado en la tabla 6.1.

Campo	Tamaño (bytes)	Contenido
Cabecera	1	0xAA
ID de comando	2	Identificador del comando
Longitud	2	Longitud del Bloque de Datos (N)
Bloque de Datos	N	Contenido del Bloque de Datos
Checksum	1	Checksum de 8 bits

Tabla 6.1: Formato de Comando

El cálculo del checksum se realiza según la ecuación 6.1:

$$CS = \left(not \left(\left(\sum_1^N bytes \right) \bmod 256 \right) + 1 \right) \quad (6.1)$$

Es decir,

1. Suma de todos los bytes del mensaje, excluyendo el campo de checksum,
2. módulo 256 de la suma obtenida,
3. y finalmente, complemento a 2 del paso anterior.

A continuación se describen las funciones de control implementadas en esta API de C++.

6.2.3. Capa de Enlace implementada: Clase *scdcomm*

Ha resultado conveniente la creación de una capa intermedia que se puede considerar como la implementación del *nivel de enlace*. Aunque sea muy simple para este tipo de comunicación, se encargará de la creación y comprobación de checksum, así como de la implementación de algunas funciones de apoyo para la capa final de nuestra API. A continuación se describe la clase que implementa este nivel:

Constructor `comando(char* id, unsigned short length, char* data)`

Al constructor de la clase se le pasan los parámetros:

- `char* id`: Identificador del comando a construir.
- `unsigned short length`: Longitud de los datos.
- `char* data`: Puntero al buffer de datos.

Este constructor monta la trama entera deseada. Incluyendo cabecera y checksum. Alternativamente se puede usar un constructor vacío (`comando()`) que resultará útil para la recepción de tramas y manejarlas más tarde.

Métodos

- `void setcmd(char* id, unsigned short length, char* data)`

Construye un objeto comando vacío. Recibe los mismos parámetros que el constructor.

- `bool enviar(void)`

Envía el objeto comando previamente construido. Devuelve 0 en caso de error, 1 en caso contrario.

- `bool recibir(int length)`

Lee del puerto serie una trama de longitud *length*. El objeto comando debe estar vacío o en caso contrario sobrescribirá sus atributos. Devuelve 0 en caso de error o 1 en caso contrario.

- `unsigned char* trama(void)`

Función auxiliar que devuelve un puntero a la trama completa del objeto comando construido. Esta función será muy útil para adaptar el API y poder usarlo en *LabVIEW*. Más adelante, en el capítulo 7, se explicará su utilidad.

6.2.4. Capa de Sesión implementada: API de comunicación

A continuación se explica en qué consisten los comandos necesarios para cambiar la ganancia y manejar el shutter del sensor. Seguidamente se documentan las funciones de la API final.

Comandos Bird Setup y Bird Setup Header Para cambiar la configuración del detector, se debe enviar siempre dos comandos: *BIRD Setup* y *BIRD Setup Header* como continuación de una transmisión satisfactoria del primero. En las tablas 6.2 y 6.3 se muestra el formato de estas tramas.

Campo	Tamaño (bytes)	Contenido
Cabecera	1	0xAA
Identificador	2	F001H
Longitud	2	Variable
Bloque de Datos	Variable	
Checksum	1	Checksum de 8 bits

Tabla 6.2: Formato de Comando *BIRD Setup*

Campo	Tamaño (bytes)	Contenido
Cabecera	1	0xAA
Identificador	2	F004H
Longitud	2	Variable
Bloque de Datos	Variable	
Checksum	1	Checksum de 8 bits

Tabla 6.3: Formato de Comando *BIRD Setup Header*

Los comandos de configuración, dentro de cada trama *Setup* y *Setup Header*, tienen la estructura mostrada en la tabla 6.4

	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Byte 0 a $m - 1$	<div>Datos de Bloque Setup 1</div> <div>Longitud de comando1 (2 bytes)</div> <div>ID de comando1</div> <div>/ID de comando1</div> <div>Setup Data1</div> <div>...</div> <div>Longitud de comando_n (2 bytes)</div> <div>ID de comando_n</div> <div>/ID de comando_n</div> <div>Setup Data_n</div>							
Byte m a $n - 1$	<div>Datos de Bloque Setup 2</div> <div>Longitud de comando1 (2 bytes)</div> <div>ID de comando1</div> <div>/ID de comando1</div> <div>Setup Data1</div> <div>...</div> <div>Longitud de comando_n (2 bytes)</div> <div>ID de comando_n</div> <div>/ID de comando_n</div> <div>Setup Data_n</div>							
Bloques adicionales ...								

Tabla 6.4: Estructura del Comando *BIRD Setup*

Para configurar la ganancia del sensor, se debe modificar los tiempos de integración, corriente de carga y capacidad del detector. Los tiempos de integración se modifican con el comando de setup *Time-Set-Cmd* y los de corriente de carga y capacidad del detector se modifican con la orden *Gain-Set-Cmd*.

La documentación ofrecida por el fabricante [12] está restringida para fines comerciales y no describe completamente los campos de las tramas de Setup que buscamos. Por esta razón, el fabricante aporta un *Engine Control* que consiste en una interfaz gráfica para cambiar las configuraciones del sensor. Sin embargo, nuestro software debe ser independiente de este *Engine Control*, y para averiguar la estructura de los parámetros de trama *Time-Set-Cmd* y *Gain-Set-Cmd* se ha procedido de la siguiente manera:

1. Inicialización del Engine Control y conexión con el sensor (Figura 6.2). Hay que recordar que los parámetros de conexión son los mismos descritos en 6.1.

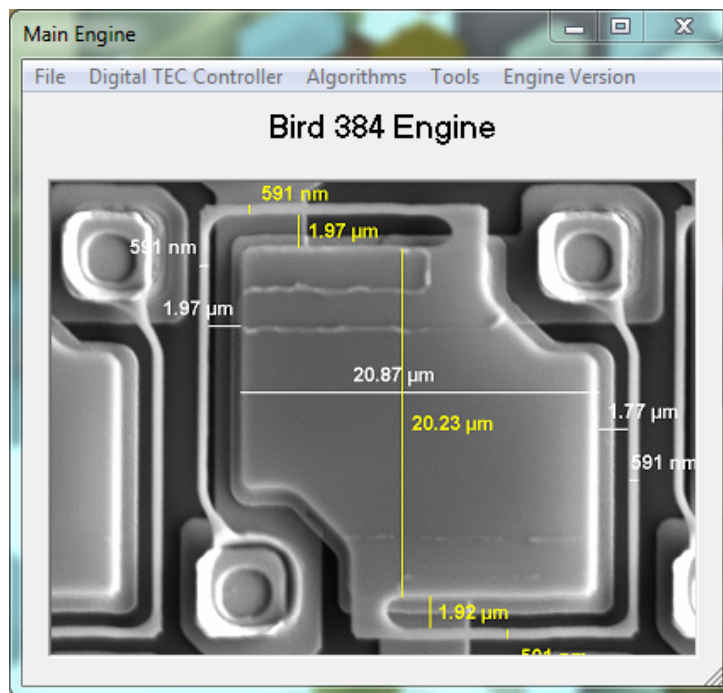


Figura 6.2: Conexión con Engine Control

2. Inicialización de un *sniffer* (permite capturar los datos transmitidos por el puerto serie) conectado al mismo puerto (Figura 6.3).
3. Captura de tramas *Time-Set-Cmd* y *Gain-Set-Cmd*.

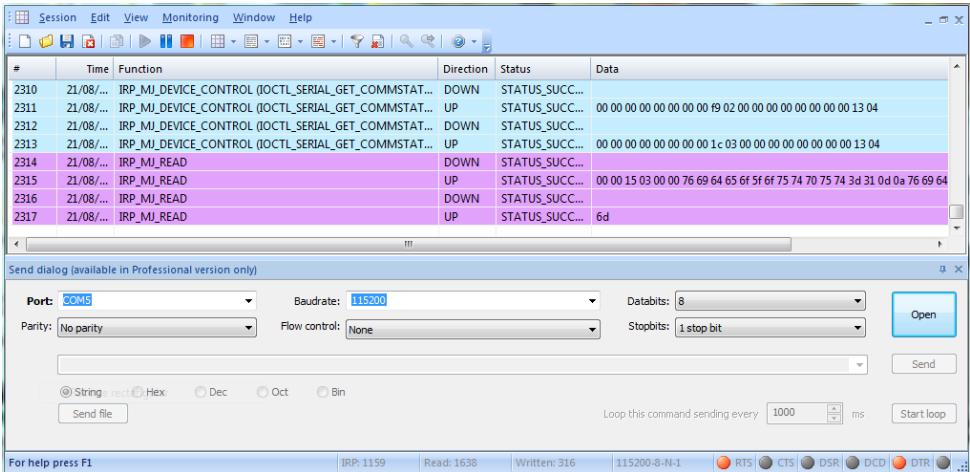


Figura 6.3: Captura de datos en puerto serie

Campo	Tamaño (bytes)	Contenido
Time_Set_Cmd longitud	2	0x0016
Time_Set_Cmd ID	1	0xBA
Time_Set_Cmd /ID	1	0x00
Time_Set_Cmd Datos	18	0x0F000F00020000000200F301F30139000700
Gain_Set_Cmd longitud	2	0x0006
Gain_Set_Cmd ID	1	0xF8
Gain_Set_Cmd /ID	1	0x00
Gain_Set_Cmd Datos	1	0x0007

Tabla 6.5: Ejemplo de Setup para cambio de ganancia

4. Análisis y extracción de campos descritos en la documentación según la estructura conocida y definida en 6.2, 6.3 y 6.4.
5. Determinación de identificadores de comando y campos de datos y comparación con los datos que se han transmitido desde el *Engine Control*.

Un ejemplo de tramas *Time_Set_Cmd* y *Gain_Set_Cmd* construidas con propósito de cambiar la ganancia del sensor, queda reflejado en la tabla 6.5.

Comando Shutter Setup Para abrir y cerrar el shutter, las tramas de control son mucho más sencillas y están completamente documentadas. Su estructura se encuentra en la tabla 6.6

Campo	Tamaño (bytes)	Contenido
Cabecera	1	0xAA
Identificador	2	8008H
Longitud	2	1H
Bloque de Datos	1	Parámetros
Checksum	1	Checksum de 8 bits

Tabla 6.6: Formato de Comando *Shutter Setup*

Como se observa, su campo de bloque de datos es de tamaño fijo (1 byte). En la tabla 6.7 se indica cómo simplemente se modifica el byte menos significativo para indicar la apertura (OFF) o cierre (ON) del shutter.

	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Byte 0	0	0	0	0	0	0	0	Shutter ON=1 Shutter OFF=0

Tabla 6.7: Estructura del Comando *Shutter Setup*

Funciones de la API A continuación se detallan las funciones implementadas en nuestra API. Esta librería permite controlar el sensor desde cualquier aplicación propia y por tanto puede ser importada para futuras aplicaciones. Además, el diseño por capas constituye la base para que la librería pueda ser completada con funciones adicionales en casos más específicos.

- `char * SCD_Init(char *sCom, char *sBaud)` Abre el puerto y lo inicializa con la configuración correcta. Devuelve el manejador del puerto. Recibe como parámetros:
 - `char *sCom`: String del puerto de Windows. Por ejemplo "\\.\COM1".
 - `char *sBaud`: String de la tasa binaria. Por ejemplo "115200".
- `int SCD_Close(char *handle)` Cierra la comunicación. Devuelve 0 si hay error o 1 en caso contrario. Recibe como parámetros:
 - `char *handle`: El manejador del puerto.
- `int SCD_Shutter(char *handle, char on)` Manda la trama de Shutter. Devuelve 0 si hay error o 1 en caso contrario. Recibe como parámetros:

- `char *handle`: Manejador del puerto.
 - `char on`: «1» para cerrar el shutter, «0» para abrirlo.
- `int SCD_Setup(char *handle, int gain)` Manda la trama Setup. Devuelve 0 si hay error o 1 en caso contrario. Recibe como parámetros:
- `char *handle`: Manejador del puerto.
 - `int gain`: Número de ganancia predefinida.
- `int SCD_Setup_Header(char *handle, int gain)` Manda la trama Setup Header. Devuelve 0 si hay error o 1 en caso contrario. Recibe como parámetros:
- `char *handle`: Manejador del puerto.
 - `int gain`: Número de ganancia predefinida.

Diseño e Implementación en *LabVIEW*

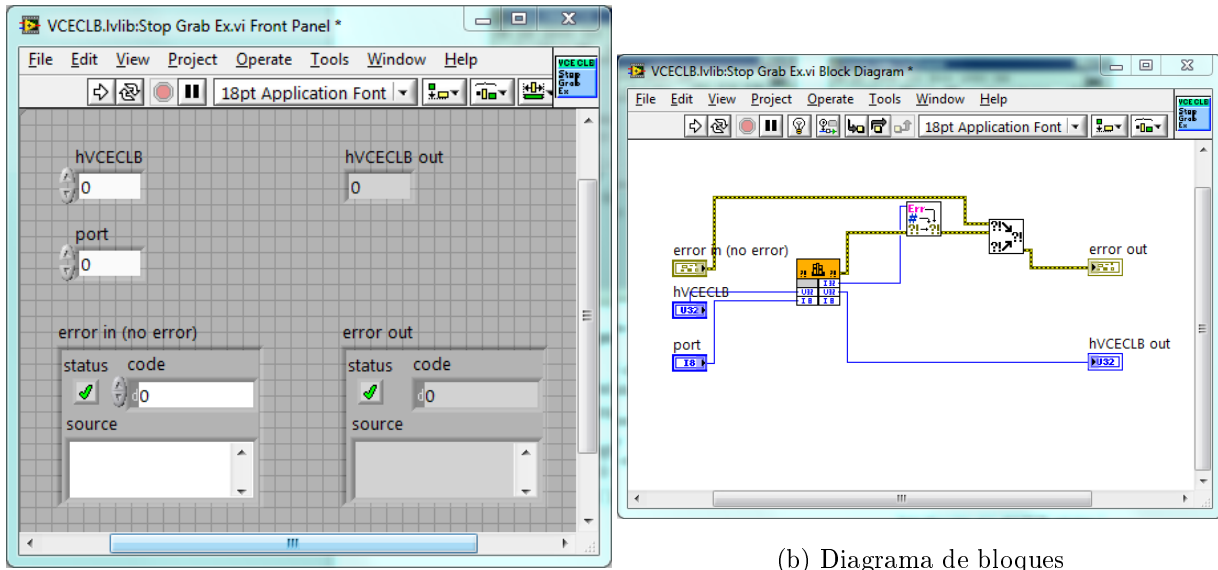
7.1. Introducción a *LabVIEW*

LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*), es un entorno de desarrollo basado en programación gráfica. Utiliza símbolos gráficos en lugar de lenguaje textual para describir acciones de programación. Está totalmente integrado para la comunicación con hardware GPIB, VXI, RS-232, RS-485 y tarjetas de adquisición de datos plug-in como *framegrabbers*. Además incorpora librerías para estándares de software como TCP/IP y ActiveX.

Los sistemas tradicionales de automatización y medida consisten en instrumentos específicos para tareas específicas. Normalmente se está obligado a diseñar el sistema desde cero y las implementaciones suelen ser más tediosas. Se puede decir que en los sistemas tradicionales el hardware define el sistema.

Todo esto cambia usando el concepto de instrumentos basados en ordenador o *instrumentos virtuales*. De este modo, se pueden diseñar sistemas de automatización y medida de bajo costo. La programación gráfica con *LabVIEW* permite a los no programadores un método fácil para implementar aplicaciones complejas de test, medida y automatización. Con *LabVIEW* el software define el sistema y el ordenador es el instrumento.

Instrumentos virtuales Los ficheros generados con *LabVIEW* se llaman *Instrumentos Virtuales*, *VI*s. Cada VI se compone de dos partes principales: el panel frontal (front panel) o interfaz con el usuario y el diagrama de bloques (block diagram) o código fuente y se puede considerar una tercera parte, que es el icono y conectores.



(a) Panel frontal

(b) Diagrama de bloques

Figura 7.1: Instrumento Virtual de Ejemplo

- El panel de control es el interfaz de usuario con el VI, en él se tendrán los controles de entrada, visualizadores de salida, cuadros de diálogo, etc.
- El diagrama de bloques es el código gráfico del VI. Está compuesto de subVIs que realizan las tareas necesarias y en su conjunto elaboran la tarea del VI.
- El icono y rejilla de conexión se localiza en la esquina superior derecha de las ventanas del panel de control y diagrama de bloques.

Las funciones creadas en nuestra API de comunicación pueden ser importadas en *LabVIEW*. Cada función será construida en *LabVIEW* como un VI y serán muy útiles para nuestro programa. Sin embargo, se han tenido que realizar algunas modificaciones a la librería para poder usarse con los instrumentos virtuales de comunicación serie de *LabVIEW* y no con la API de Windows en que está basada nuestra librería inicial, como se explicó en 6.2.1.

En la siguiente sección se explicarán los cambios realizados.

7.2. Adaptación de la API para *LabVIEW*

La biblioteca de comunicación serie de *LabVIEW* tiene el Toolbox de la figura 7.2, cuyos VIs en su conjunto completan las mismas funciones que la propia librería de Windows.

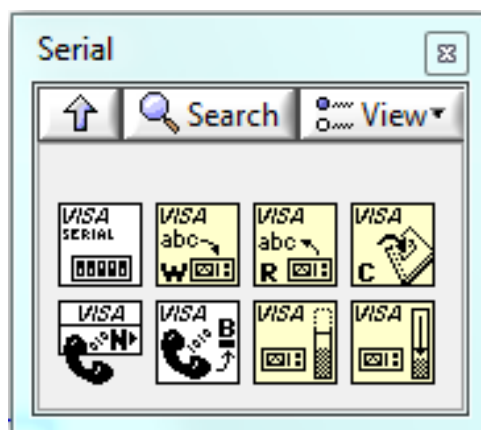


Figura 7.2: ToolBox de Comunicación Serie

Por tanto, se generará una librería basada en la anterior, pero prescindiendo de la librería *CComport* descrita en 6.2.1. Además hay que tener cuidado al elegir los tipos de entrada y salida de las funciones, porque al importar cada función en *LabVIEW*, deben ser manipulados como tipos propios de *LabVIEW*. Por ejemplo: un string en C no es más que un array de bytes acabados en «\0», sin embargo en *LabVIEW* no es así, y se debe conocer la longitud de la cadena para construir el array.

La modificación de la librería consiste en los siguientes puntos:

- **Supresión de la librería *CComport***

Ahora las funciones no mandarán las tramas por el puerto serie, las devolverá en un puntero para ser transmitidas con el ToolBox de *LabVIEW*.

- **Supresión de algunas funciones que ya no son útiles en la API**

Estas funciones son *SCD_Init* y *SCD_Close*. También serán sustituidas por VIs del ToolBox de *LabVIEW*

- **Añadir parámetro de longitud de trama a las funciones**

Las funciones *SCD_Setup* y *SCD_Setup_Header* ahora tendrán un parámetro de salida (pasado como puntero), que permitirá indicar a *LabVIEW* la longitud de la trama devuelta al ser ésta de tamaño variable. No será necesario en *SCD_Shutter*, ya que sus tramas son de tamaño constante, como se definió en la tabla 6.7

De esta manera, nuestra librería modificada (llamada con sufijo «_lv.h», *apibird_lv.h*) queda de la siguiente manera:

■ `void SCD_Shutter(char on, unsigned char* trama)`

Se pasan como parámetros:

- `char on`: 1 o 0 para cerrar o abrir el shutter
- `unsigned char* trama`: puntero donde se escribe la trama. En *LabVIEW* se debe realizar la reserva de memoria y la lectura del array de tamaño conocido (13 bytes).

■ `void SCD_Setup(int ganancia, unsigned char* trama, int* size)`

Se pasa como parámetros:

- `int ganancia`: Entero para seleccionar la ganancia predefinida.
- `unsigned char* trama`: puntero donde se escribirá la trama. En *LabVIEW* se debe realizar la reserva de memoria y la lectura del array de tamaño conocido. Se hará una reserva suficientemente grande (con 128 bytes es más que suficiente), y la lectura se hará conociendo el tamaño exacto de la trama devuelto por el siguiente parámetro.
- `int* size`: Puntero a entero que indicará a la salida el tamaño de la trama devuelta en el punto anterior.

■ `void SCD_Setup_Header(int ganancia, unsigned char* trama, int* size)`

De la misma manera que en la función anterior, se pasa como parámetros:

- `int ganancia`: Entero para seleccionar la ganancia predefinida.
- `unsigned char* trama`: puntero donde se escribirá la trama. De igual manera, haremos una reserva suficientemente grande (128 bytes), y la lectura se realizará conociendo el tamaño exacto de la trama devuelto por el siguiente parámetro.
- `int* size`: Puntero a entero que indicará a la salida el tamaño de la trama devuelta en el punto anterior.

Una vez generada la biblioteca de enlace dinámico (comúnmente conocida como DLL), se procede a generar la librería de funciones de *LabVIEW*. Esto se realiza con ayuda del asistente

«Tools->Import->Shared Library (.dll)». A continuación se muestra como quedan los VIs de las funciones importadas.

En la figura 7.3 se construye un array de 13 bytes inicializados a 0 con el «*Build Array.vi*». Este array se pasa como puntero al «*Call Library Function*» que llamará a nuestra función de C++. Así mismo, se pasa un entero con valor 1 o 0 para cerrar o abrir el shutter. Como salida se obtiene un array de 13 bytes con el contenido de la trama construida.

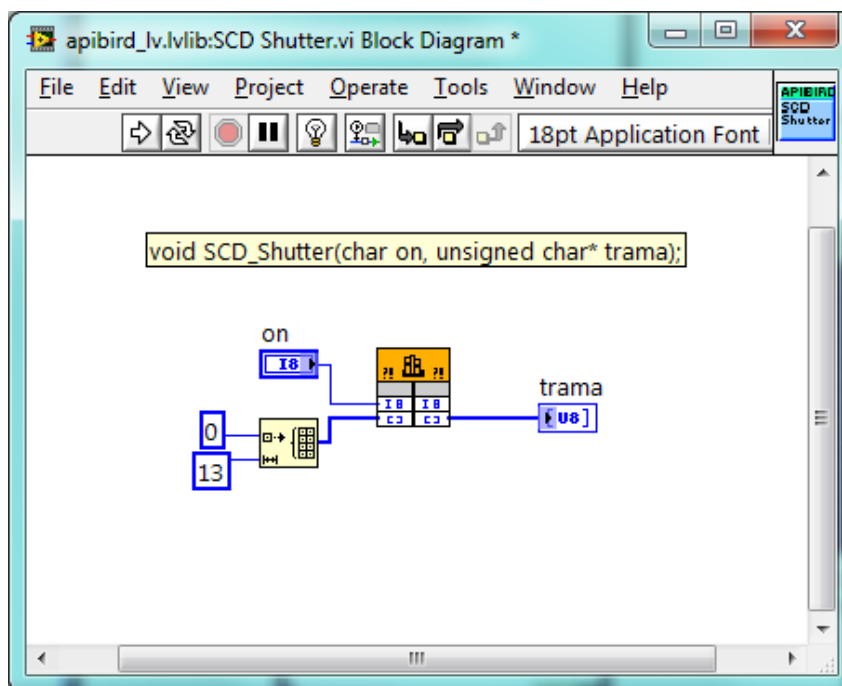


Figura 7.3: Diagrama de bloques SCD Shutter

En la figura 7.4 se encuentran los diagramas de bloque de los instrumentos virtuales «*SCD Setup.vi*» (figura 7.4a) y «*SCD Setup Header.vi*» (figura 7.4b). Se observa como tanto la reserva de memoria y la obtención de parámetros de salida se gestiona de la misma manera en ambos casos:

- En primer lugar, se construye un array de bytes inicializado a 0 y de tamaño 128 a la entrada. El indicador de tamaño, también se pasa como puntero a la entrada y lo obtendremos modificado a la salida de la función con el tamaño real de la trama construida.
- A la salida, una vez construida la trama en el array de 128 bytes, se extrae la misma haciendo uso del parámetro «*size*» modificado internamente en la función. Esto se realiza con el vi «*Array subset.vi*».

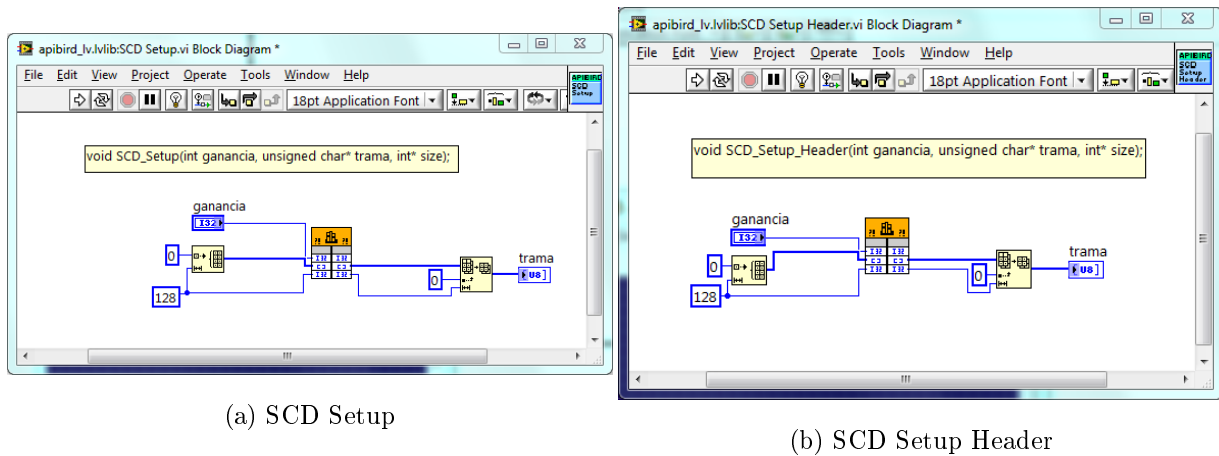


Figura 7.4: Diagramas de Bloque de los VIs Setup y Setup Header

Finalmente, ya se tiene toda la librería de comunicación del SCD Bird adaptada y preparada para ser usada con el ToolBox de comunicación serie de *LabVIEW*. En la sección siguiente se describe brevemente las librerías propietarias de la «framegrabber ImperX» y de *FLIR* usadas para adquirir imágenes de la cámara *Sensia SISy* realizar el control de la cámara de *FLIR A325* respectivamente. También se explica los parámetros de configuración que se han usado.

7.3. Librería de adquisición *ImperX* para *LabVIEW*

El SDK que proporciona el fabricante de la *framegrabber* es similar al elaborado en este proyecto para la comunicación con el SCD Bird. La librería ha sido programada en C para propósitos de diseño en este lenguaje y además, integran el Toolkit de *LabVIEW* elaborado de la misma manera que hemos realizado el nuestro de comunicaciones.

Sin entrar en detalle de las funciones utilizadas en este SDK, cuya información puede encontrarse en su documentación [10], se describirá la configuración necesaria basada en los datos del fabricante del sensor y en los requisitos de nuestro propio diseño.

En la figura 7.5 se muestran los datos de configuración del enlace *CameraLink* extraídos de las hojas de características del sensor SCD. Estos parámetros son:

- WidthPreValid: Número de píxeles al comienzo de línea que deben ser ignorados. **162 píxeles**
- Width: Número de píxeles de una línea. **384 píxeles**

- WidthPostValid: Número de píxeles al final de línea que deben ser ignorados **174 píxeles**
- HeightPreValid: Número de líneas a ignorar al comienzo de una imagen. **0 líneas**
- Height: Número de líneas de la imagen. **288 líneas**
- HeightPostValid: Número de líneas a ignorar al final de la imagen. **152 líneas**
- BitDepth: Resolución binaria del píxel. **16 bits**

También se puede ver cómo se pasa una constante «Port=0»: de esta manera la selección del puerto de la cámara se realiza automáticamente (podemos conectar la cámara en cualquiera de los dos puertos de la tarjeta FrameGrabber).

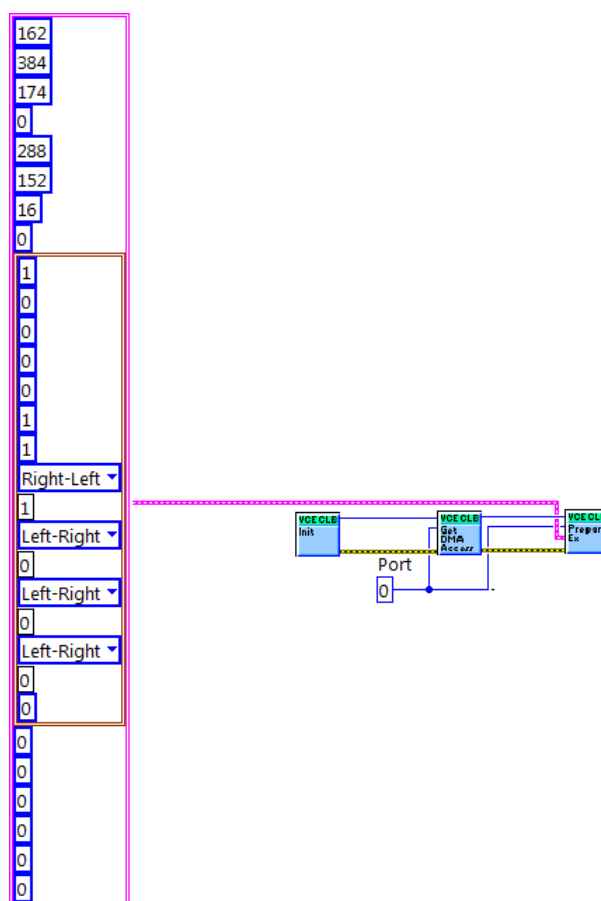


Figura 7.5: Configuración de los datos de enlace CameraLink

Otro parámetro *muy importante* para el diseño de nuestro sistema es el tamaño de la cola de entrada de la *FrameGrabber*. Esto es de primera importancia, ya que las imágenes de ambas

cámaras deben estar sincronizadas. Por tanto, la cola que se usará para la captura de imágenes será *Preemptiva* y de tamaño 1. Con este diseño, la diferencia temporal entre imágenes en un mismo ciclo de captura no viene dado por nuestro software de *LabVIEW*, ya que al funcionar con ciclos de 1KHz se garantiza que el desfase máximo entre imágenes viene dado por la máxima diferencia de sincronismo que pueda haber entre sensores, es decir, 16,66ms, más que suficiente para el propósito del proyecto. Estos parámetros de configuración de la cola de entrada se pasan al VI mostrado en la figura 7.6.

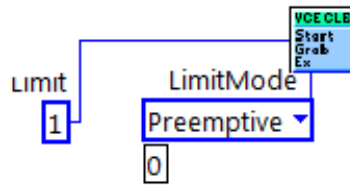


Figura 7.6: Configuración de la cola del FrameGrabber ImperX

7.4. Software *Thermovision LabVIEW Toolkit*

Tanto para el control como para la adquisición de imágenes de nuestra cámara de la cara fría descrita en la sección 4.1, se usarán los drivers y el SDK proporcionados por el fabricante [4].

Este completo SDK de *LabVIEW* permitirá:

- Realizar toda la comunicación con la cámara a través de cable Ethernet.
- Tener control completo de la cámara.
- Cambiar opciones de medida. En este caso sólo se quiere hacer la medición radiométrica que permitirá con postprocesado extraer la información deseada con mayor precisión.
- Usar VIs basados en ActiveX.

Para la configuración de la cámara, se han usado los parámetros reflejados en las figuras 7.7 y 7.8. El instrumento virtual que inicializa la conexión y devuelve el manejador o referencia de la cámara, «*Thermovision Open.vi*» (Figura 7.7), adquiere los siguientes:

- *CameraType*: Simplemente seleccionar la opción correspondiente a nuestro modelo de cámara, FLIR A325.

- *Port*: 1. De esta manera usará el primer y único puerto Ethernet de nuestro PC. Podría haberse puesto la opción «0», que busca el puerto automáticamente, pero teniendo sólo un puerto en el ordenador, sólo añadiría coste computacional.
- *Device*: Ethernet 16-bit images. Es nuestro tipo de dispositivo, se capturan imágenes de 16 bits con Gigabit Ethernet.
- *Interface*: Gigabit Ethernet.

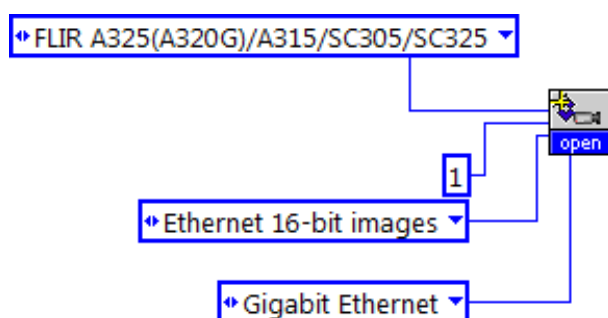


Figura 7.7: Configuración del VI Thermovision Open

El único parámetro aparte del manejador de la cámara que hay que pasar al VI «*Thermovision GetImg.vi*» (figura 7.8), es el tipo de dato a capturar. En nuestro caso, como se ha dicho anteriormente, interesan los valores radiométricos. Esto se consigue pasando el parámetro «*Absolute*» (o «*Raw*», que aunque ha quedado obsoleto en esta versión, se mantiene la compatibilidad).

Una funcionalidad que tiene esta cámara a diferencia de la anterior y que se ha incorporado en el programa, es el control del enfoque tanto manual como automático (ver tabla 4.1) desde el panel de control.

Esta función se implementa de la siguiente manera:

1. Se construye un array compuesto de los controles «*Far*, «*Near*, «*SetAbsPos* y «*AutoFocus*»,



Figura 7.8: Configuración del VI Thermovision Get Img

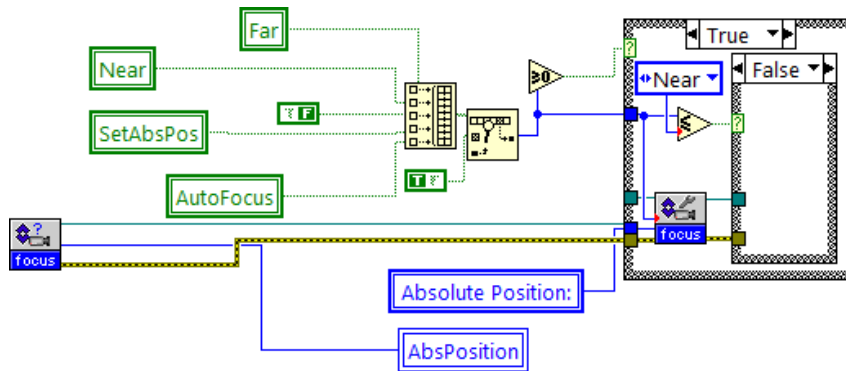


Figura 7.9: Diagrama de Bloques para el enfoque de la FLIR A325

estos valores pueden cambiar en cada ciclo del programa y serán los que activen el motor de enfoque cuando sean presionados (obtengan valor «True»).

2. Se busca un «True» en dicho array.
3. En caso de que esto ocurra, se realiza el enfoque de la manera indicada. Es decir:
 - Si se ha presionado «Far»: Se activa el motor para enfoque lejano
 - Si se ha presionado «Near»: Se activa el motor para enfoque cercano
 - Si se ha presionado «SetAbsPos»: Se activa el motor hasta posicionar la lente en la posición indicada.
 - Si se ha presionado «AutoFocus»: Se activa el motor hasta realizar el enfoque automático óptimo (mayor área enfocada).
4. El siguiente paso es parar el motor en caso de que se haya presionado el enfoque manual «Far» o «Near». Así se evita que el motor siga corriendo hasta el siguiente ciclo de programa, donde se volverá a hacer lectura del estado de los controles de enfoque.

7.5. Descripción del Panel Frontal

En la sección anterior se explicó la necesidad de implementar y/o usar ciertas librerías de control para nuestro programa en *LabVIEW* y cómo se ha trabajado en ellas. En esta sección se explicarán las partes que forman nuestra interfaz gráfica y cómo usarlas. Por comodidad, dada la extensión de la interfaz, esta se muestra completamente en el apéndice **B**

La interfaz está compuesta de cinco paneles claramente diferenciados, pero visibles en todo momento. Estos son:

1. **Selector de cámara** (Figura 7.10). Como se explicó en el capítulo 5, este será el selector del «modo de funcionamiento». Girando el control del panel se cambiarán los parámetros de inicio para arrancar el programa en un modo o en otro. Por defecto está seleccionado el modo dual, es decir, inicializa las dos cámaras.

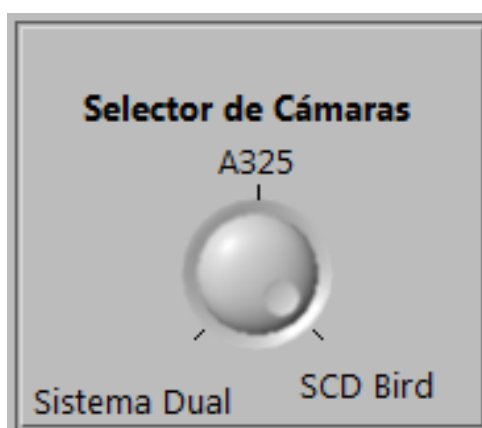


Figura 7.10: Subpanel del Selector de Cámaras

2. **Configuración de adquisición** (Figura 7.11). En este subpanel, una vez inicializado el software en el modo deseado, se debe introducir los parámetros de adquisición.

Como se puede ver, está formado por tres controles colocados en tres líneas que comienzan con *FPS*, *FPS 1* y *FPS 2* correspondientes a cada una de las tres fases de adquisición. La adquisición comenzará con los ajustes de la primera fase, acto seguido capturará imágenes con los ajustes de la segunda fase, y terminará con los parámetros de la tercera fase. Esto se ha hecho así para poder repartir el número total de imágenes de adquisición en tres fases con distinta resolución temporal cada una, es decir, poder emplear unos *frames por segundo* más elevados en la primera y última fase correspondientes a la fase de calentamiento y enfriamiento respectivamente y una tasa de adquisición menor en la etapa de la quema en la que no se producirán cambios rápidos en la naturaleza del material. De esta manera se consigue hacer una gestión más eficiente de los recursos de memoria.

En cada control «*FPS*» se indicarán los *Frames por segundo*, o tasa de adquisición en hercios deseada para la captura de imágenes en dicha fase. El máximo es de 18Hz en modo



Figura 7.11: Subpanel de Configuración de Adquisición

DUAL (ver resultados en parte III), pero se debe trabajar con «economía» y limitar esta tasa al valor necesario para el experimento, evitando así problemas de memoria o disco, o posible pérdida de frames por interrupción del planificador del sistema operativo. Unos ajustes habituales de este parámetro para el estudio térmico de paneles de composite son 6Hz para la primera fase, 1Hz para la fase intermedia, y 6Hz o menos para la última.

El funcionamiento es el mismo para cada línea de controles. En el control «*Número de Frames*» se introducirá el número máximo de frames que se va a capturar en dicha fase. El producto de estos dos controles (FPS y número de frames), da como resultado el tiempo total de adquisición para la fase de captura:

$$T_{captura} = FPS \times N_{frames} \quad (7.1)$$

Este valor se verá reflejado en el indicador «*Tiempo (s)*» por si se quiere realizar el ajuste de estos parámetros en base a tiempo total de captura.

3. **Progreso** (Figura 7.12). Este subpanel sólo será útil durante la adquisición de imágenes. Una vez pulsado el botón de «*Adquirir*» se activará la barra de progreso, vacía al comienzo, y llena al finalizar la toma de imágenes. Así mismo, se indica el número de imágenes adquiridas en tiempo real en el indicador bajo la barra de progreso.

En este mismo panel se encuentran dos pulsadores muy importantes en nuestro programa:

- Pulsador «*Parada*». Pulsando este botón se interrumpirá la adquisición o la visualización de imágenes como queda reflejado en el diagrama de la figura 5.1. Para evitar pulsaciones indeseadas, deberá mantenerse pulsado durante 3 segundos para que se realice la parada.
- Pulsador «*Adquirir*». Con él se lanza la adquisición de las imágenes a la tasa seleccionada. Durante el proceso de adquisición se pondrá en marcha la barra de progreso que aparece en el subpanel descrito a continuación.

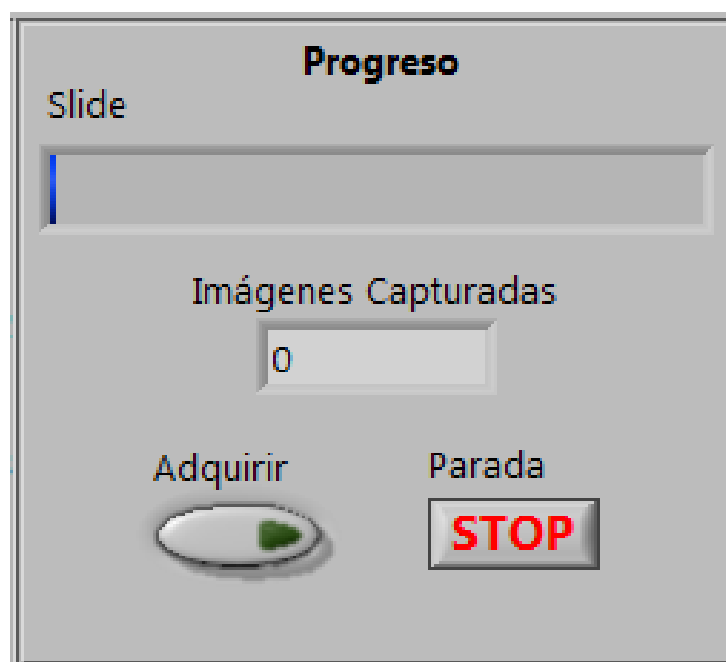


Figura 7.12: Subpanel de Progreso de Adquisición

4. **Enfoque FLIR A325** (Figura 7.13). En el subpanel de enfoque de la Flir A325 se podrá realizar el enfoque automático o manual de la cámara. Para el modo automático, bastará con pulsar el botón «Auto». Para el modo manual se puede operar de dos formas:

- a) Pulsando los botones «Far» y «Near» que moverá el motor enfocando *más lejos* o *más cerca* respectivamente, mientras se visualiza en tiempo real los resultados del enfoque.
- b) Introduciendo en el control «Absolute Position» la referencia numérica de la posición de la lente. Este uso no es práctico salvo que el sistema se encuentre en un banco de

pruebas estático y el punto de enfoque deba ser siempre el mismo.

El indicador en este subpanel devolverá la referencia de la posición de la lente para poder usar la misma en futuros ensayos si fuera deseado.

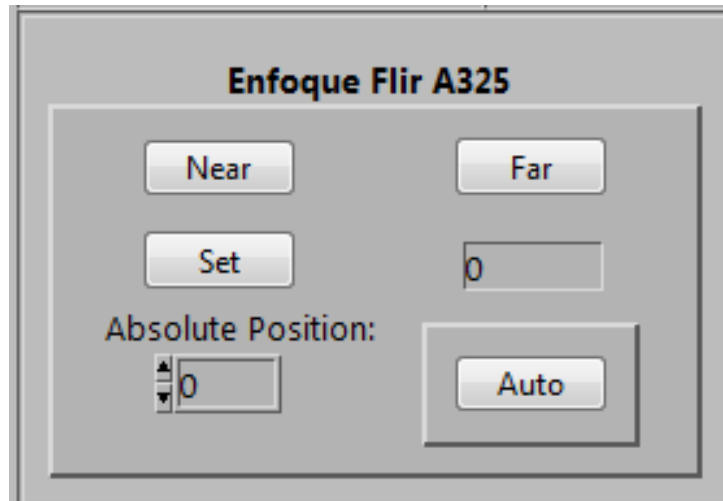


Figura 7.13: Subpanel de Enfoque de la cámara FLIR A325

5. **Configuración SENSIA Cam.** (Figura 7.14). En este panel encontramos el selector de puerto serie con el que nos comunicaremos con la cámara, un control para abrir y cerrar el shutter, y el selector de ganancias. Las ganancias han sido elegidas para tres rangos de temperatura. Estos son:

- Ganancia Alta, para temperaturas de cuerpo negro de -20 a 150°C .
- Ganancia Media, para temperaturas de cuerpo negro de 0 a 350°C .
- Ganancia Baja, para temperaturas de cuerpo negro de hasta 1200°C , teniendo el filtro de llama usado en quemas integrado en la óptica.

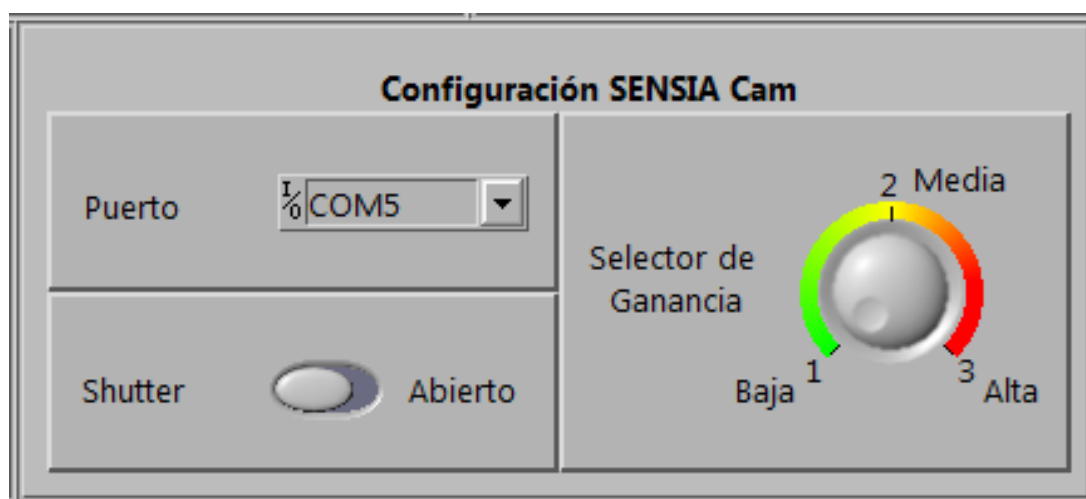


Figura 7.14: Subpanel de Configuración de la cámara Sensia SIS

Parte III

EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

Es necesario, una vez construido nuestro sistema, comprobar que las prestaciones del mismo concuerdan con las esperadas. Por tanto, se han realizado las pruebas que garantizan un correcto funcionamiento con el sistema funcionando bajo la configuración más restrictiva: mayor tiempo de integración (o ganancia), y mayor frecuencia de adquisición. En este capítulo, se explica en qué han consistido estos análisis, los resultados obtenidos y termina con un experimento real de análisis de resistencia a fuego de un panel de material *composite* utilizando nuestro sistema.

Experimentos Realizados

Como se ha explicado anteriormente, uno de los mayores problemas que se ha tenido que solventar, es la gestión eficiente de memoria. El sistema es de memoria limitada, por lo que existirá un límite máximo de número de imágenes a adquirir. Por otra parte, el sistema también es limitado en velocidad de procesado y de transmisión de imágenes de la cámara al ordenador, de manera que habrá que limitar la tasa máxima de adquisición a un valor que garantice su óptimo comportamiento.

8.1. Pruebas de memoria

En esta sección se realizan las pruebas de memoria partiendo del límite que teníamos con el sistema anterior. El sistema reemplazado usaba para la cara caliente una cámara con menor tamaño de array, por lo que además, el consumo de memoria por imagen era menor que el nuestro. Este límite era de 1200 imágenes para cada cámara. Las pruebas realizadas en este proyecto demuestran cómo nuestro sistema soporta una adquisición límite de 2800 imágenes en el modo dual, más del doble del que se podía disfrutar antes, además de tener una mayor resolución espacial.

Para realizar esta prueba, se han realizado numerosas pruebas de funcionamiento durante la misma mañana, monitorizando los recursos del sistema operativo en todo momento, y comprobando que la tasa de adquisición ha sido correcta (no ha habido pérdida de imágenes). En la tabla 8.1 se muestra la batería de pruebas y resultados de rendimiento en memoria. Se encuentra marcado en verde el numero máximo de imágenes adquiridas sin fallo de memoria para cada mo-

do de adquisición. Para asegurar de que podemos usar el límite sin riesgo de fallo, se ha repetido cada ensayo satisfactorio 10 veces.

8.2. Pruebas de velocidad de adquisición

El límite máximo de frecuencia de adquisición viene dado por lo siguiente:

1. El ciclo de adquisición mínimo del programa: Se usa un reloj de 1KHz, por lo que un ciclo mínimo es de 1ms.
2. El tiempo de integración de la/s cámara/s: Mucho mayor que el período mínimo del ciclo de adquisición. Es decir, siempre se está limitado por la tasa más restrictiva que proporcione la o las cámaras usadas.
3. El tiempo de transmisión y procesado.

Teniendo en cuenta que ambas cámaras proporcionan una tasa máxima de 60Hz (características en 4.1 y 4.2), se ha realizado un programa que permita buscar la frecuencia máxima de adquisición partiendo de este límite ideal. Un ciclo temporizado de LabVIEW permite la señalización de ciclos que hayan sufrido retardos mayores a los esperados. En la figura 8.1 se muestra cómo ha sido realizado.

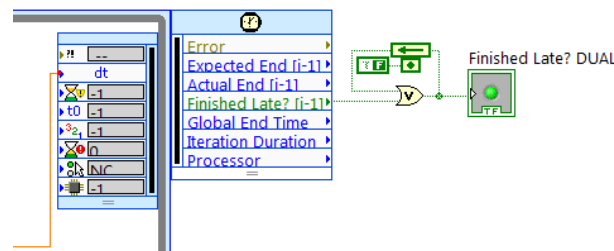


Figura 8.1: Test de ciclo de ejecución excedido

Aprovechando el bucle temporizado de LabVIEW, se ha introducido un indicador luminoso que indicará cuando un solo ciclo en una captura haya excedido el tiempo de ejecución deseado. La realimentación y la puerta lógica OR es útil para evitar añadir demasiada carga computacional al realizar el test.

Los resultados obtenidos son los de la tabla 8.2, también habiendo repetido cada resultado satisfactorio 10 veces.

Modo de Funcionamiento	Número Total de imágenes	Tasa de Fase 1	Tasa de Fase 2	Tasa de Fase 3	¿OK?	Comentario
Dual	1200	5 Hz	5 Hz	5 Hz	Sí	Error de memoria de LabVIEW: No hay suficiente para el volcado a disco.
Dual	1500	5 Hz	1 Hz	2 Hz	Sí	
Dual	1800	5 Hz	1 Hz	2 Hz	Sí	
Dual	1000	5 Hz	1 Hz	2 Hz	Sí	
Dual	2000	5 Hz	5 Hz	5 Hz	Sí	
Dual	2200	5 Hz	1 Hz	2 Hz	Sí	
Dual	2600	5 Hz	1 Hz	2 Hz	Sí	
Dual	2800	5 Hz	1 Hz	2 Hz	Sí	
Dual	3000	1 Hz	1 Hz	2 Hz	No	
Dual	2900	1 Hz	1 Hz	2 Hz	No	
Dual	2850	1 Hz	1 Hz	2 Hz	No	Error de memoria de LabVIEW: No hay suficiente para el volcado a disco.
A325	3000	5 Hz	5 Hz	5 Hz	Sí	Error de memoria de LabVIEW: No hay suficiente para el volcado a disco.
A325	5000	5 Hz	5 Hz	5 Hz	Sí	
A325	5800	5 Hz	5 Hz	5 Hz	Sí	
A325	5850	5 Hz	5 Hz	5 Hz	No	
A325	6000	5 Hz	5 Hz	5 Hz	No	
Sensia	3000	5 Hz	5 Hz	5 Hz	Sí	Error de memoria de LabVIEW: No hay suficiente para el volcado a disco.
Sensia	4500	5 Hz	5 Hz	5 Hz	Sí	
Sensia	4550	5 Hz	5 Hz	5 Hz	No	
Sensia	4600	5 Hz	5 Hz	5 Hz	No	
Sensia	4800	5 Hz	5 Hz	5 Hz	No	

Tabla 8.1: Tabla de pruebas de memoria

Modo de Funcionamiento	Número Total de imágenes	Tasa de Fase 1	Tasa de Fase 2	Tasa de Fase 3	¿OK?	Comentario
Dual	2800	60 Hz	60 Hz	60 Hz	No	Finished Late
Dual	2800	30 Hz	30 Hz	30 Hz	No	Finished Late
Dual	2800	20 Hz	20 Hz	20 Hz	No	Finished Late
Dual	2800	16 Hz	16 Hz	16 Hz	No	Finished Late
Dual	2800	15 Hz	15 Hz	15 Hz	Sí	
Dual	2800	14 Hz	14 Hz	14 Hz	Sí	
Dual	2800	12 Hz	12 Hz	12 Hz	Sí	
Dual	2800	10 Hz	10 Hz	10 Hz	Sí	
A325	5800	60 Hz	60 Hz	60 Hz	No	Finished Late
A325	5800	40 Hz	40 Hz	40 Hz	No	Finished Late
A325	5800	30 Hz	30 Hz	30 Hz	No	Finished Late
A325	5800	29 Hz	29 Hz	29 Hz	No	Finished Late
A325	5800	28 Hz	28 Hz	28 Hz	Sí	
A325	5800	14 Hz	27 Hz	14 Hz	Sí	
A325	5800	12 Hz	20 Hz	12 Hz	Sí	
Sensia	4500	60 Hz	60 Hz	60 Hz	No	Finished Late
Sensia	4500	59 Hz	59 Hz	59 Hz	No	Finished Late
Sensia	4500	58 Hz	58 Hz	58 Hz	Sí	
Sensia	4500	57 Hz	57 Hz	57 Hz	Sí	
Sensia	4500	50 Hz	50 Hz	50 Hz	Sí	
Sensia	4500	30 Hz	30 Hz	30 Hz	Sí	

Tabla 8.2: Tabla de pruebas de tiempos

8.3. Prestaciones del sistema

A modo comparativo, este software adquiere en modo dual más del doble de imágenes que el usado anteriormente. Por otra parte, la tasa de adquisición máxima ha pasado de ser de 2Hz a 15Hz en modo dual. Este rendimiento de ejecución, junto con la posibilidad de configurar las tasas en tres fases, permitirá realizar un estudio con más resolución temporal, y se puede apreciar mejor los cambios transitorios en el proceso de quema, como son los puntos de vaporización de los materiales. A continuación se muestran los resúmenes de prestaciones del sistema en base a las pruebas realizadas.

Número máximo de imágenes	2800 ($\times 2$)
Tasa máxima de adquisición	15Hz
Resolución de imagen de cara fría	320×240 píxeles
Resolución de imagen de cara caliente	384×288 píxeles
Ajustes de Enfoque automático	Sólo A325
Ajustes de Ganancia	Sólo Sensia

Tabla 8.3: Prestaciones en Modo Dual

Número máximo de imágenes	5800
Tasa máxima de adquisición	28Hz
Resolución de imagen de cara fría	320×240 píxeles
Ajustes de Enfoque automático	Sí
Ajustes de Ganancia	No

Tabla 8.4: Prestaciones en Modo A325

Número máximo de imágenes	4500
Tasa máxima de adquisición	58Hz
Resolución de imagen	384×288 píxeles
Ajustes de Enfoque automático	No
Ajustes de Ganancia	Sí. Alta: De -20 a 150°C . Media: de 0 a 350°C . Baja: Hasta 1200°C con filtro de llama.

Tabla 8.5: Prestaciones en Modo Sensia

Resultados

Como último hito del proyecto, se ha realizado un experimento real de quema de material compuesto con el sistema de adquisición. Podemos ver el escenario de la quema en la figura 9.1, con las cámaras enfocando a cada cara del panel, y el quemador todavía sin encender.



Figura 9.1: Escenario de quema con nuestro sistema

En la figura 9.2 se muestran las vistas del panel desde ambas cámaras, la cara caliente desde la Sensia (9.2a) y la cara fría desde la FLIR A325 (9.2b).

Tras lanzar el programa y aplicar los ajustes deseados, se espera a que el Sol se oculte tras la pared del edificio para comenzar la adquisición de imágenes y encender el quemador. De esta

manera se evita que la radiación solar tenga influencia significativa sobre las medidas (figura 9.3).



(a) Vista de la cara caliente desde la Sensia

(b) Vista de la cara fría desde la A325

Figura 9.2: Vistas del panel desde ambas cámaras



Figura 9.3: Vista del programa visualizando

Habiendo comenzado la adquisición, se enciende el quemador (figura 9.4).



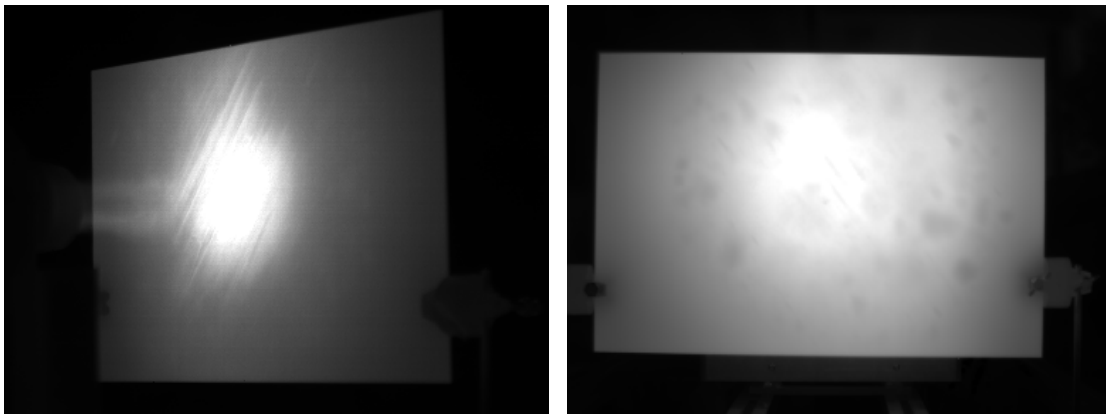
Figura 9.4: Quemador encendido y capturando

Tras la quema, el programa finaliza con normalidad, y obtenemos las imágenes deseadas en ambos ficheros FITS para ser procesados y analizados en el Laboratorio.



Figura 9.5: Instante de la quema con algunos compañeros y profesores del LIR

De los ficheros FITS obtenidos, se muestra a continuación dos imágenes radiométricas de ambas caras del panel obtenidas en el mismo instante.



(a) Imágen de la cara caliente obtenida con Sen-
sia SIS 384.L

(b) Imágen de la cara fría obtenida con FLIR
A325

Figura 9.6: Imágenes radiométricas de ambas caras del panel de material compuesto en el mismo instante de la quema

Parte IV

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El proyecto realizado ha cumplido con todos los objetivos descritos al principio de la memoria. Partiendo de un cambio radical del hardware empleado, se ha conseguido realizar un sistema portable y de mayores prestaciones que el anterior. Por otra parte, los test de funcionamiento del software han sido muy satisfactorios, ya que se ha conseguido adquirir a una frecuencia mucho más elevada y aumentar a más del doble el volumen total de imágenes, lo cual va a permitir realizar análisis de más precisión.

Por otra parte, la posibilidad de adquirir en tres fases permite distribuir el número máximo de tomas de manera más eficiente, pudiendo emplear una tasa mucho más elevada en las fases cortas de calentamiento y enfriamiento, y una tasa más lenta en la larga etapa intermedia, donde se alcanza un comportamiento estacionario.

La programación de una librería de comunicación para la cámara Sensia SIS 384.L ha incorporado al software la posibilidad de realizar cambios en la ganancia de la cámara y controlar el shutter. Sin embargo, la principal ventaja de este trabajo es su diseño por capas y la codificación en C++, lo cual ha aportado la mayor versatilidad posible para futuros trabajos: por ejemplo, para ser utilizada en sistemas *Linux*, bastará con cambiar la clase de gestión del puerto serie y no será necesario modificar las clases de niveles superiores.

Con este trabajo en el software de control, se ha construido una sólida base para futuros desarrollos que requieran un control más exhaustivo del sensor de la cámara. El trabajo futuro en la ampliación de la librería de comunicación, podrá aportar otras muchas funcionalidades del sensor [12] y permitirá desarrollar software propio con objetivos muy específicos.

Otras ideas de desarrollo futuro específicas para nuestro sistema son:

- Incorporar algoritmos de corrección espacial al programa en *Lab View*.
- Incorporar un algoritmo de detección automática de cambio de fase transitoria a estacionaria en el comportamiento del material, lo cual es muy interesante si no se conocen las cualidades térmicas del mismo y no será necesario realizar cálculos previos para determinar los tiempos de calentamiento y enfriamiento del mismo.
- Añadir más cámaras que permitan visualizar otras secciones de la estructura sometida a ensayo y de esta forma, aplicar el sistema de ensayo a especímenes 3D.
- Añadir un fichero de texto con información temporal a las capturas de imágenes.

APÉNDICES

PRESUPUESTO DEL PROYECTO

En este apéndice se presentan justificados los costes globales de la realización de este Proyecto de Fin de Carrera. Tales costes, imputables a gastos de personal y de material, se pueden deducir de las Tablas [A.1](#), [A.2](#), [A.3](#) y [A.4](#).

<i>Fase 1</i>	<i>Documentación y planificación</i>	350 horas
<i>Fase 2</i>	<i>Desarrollo de librería de control</i>	270 horas
<i>Fase 3</i>	<i>Desarrollo del programa en LabView</i>	280 horas
<i>Fase 4</i>	<i>Pruebas y validación</i>	40 horas
<i>Fase 5</i>	<i>Redacción de la memoria del proyecto</i>	250 horas

Tabla A.1: Fases del Proyecto

En la Tabla [A.1](#) se muestran las fases del proyecto y el tiempo aproximado para cada una de ellas. Así pues, se desprende que el tiempo total dedicado por el proyectando ha sido de 1.190 horas, de las cuales aproximadamente un 30 % han sido compartidas con el director del proyecto, por lo que el total asciende a 1.547 horas. Teniendo en cuenta que la tabla de honorarios del Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación establece unas tarifas de 20.52€/hora para el ingeniero Junior, y 30.76€/hora para el senior y siendo el hombre×mes=131.25 horas, el coste de personal se sitúa en 35397.14 €, como se desglosa en la tabla [A.2](#).

Cálculo de amortización de equipos, según:

$$C_{amort} = \frac{A}{B} \times C \times D \quad (\text{A.1})$$

siendo,

<i>Apellidos y nombre</i>	Categoría	Dedicación (hombres × mes)	Coste hombre × mes	Coste (€)
<i>Álvarez García, Hugo</i>	Ingeniero	9.06	2694.39€	24411.17€
<i>Cortés Martínez, Francisco</i>	Ingeniero	2.72	4038.96€	10985.97€
TOTAL				35397.14 €

Tabla A.2: Personal

- A = número de meses de utilización del equipo tras fecha de facturación.
- B = período de depreciación del equipo.
- C = coste del equipo sin impuestos.
- D = % del uso que se dedica al proyecto.

<i>Descripción</i>	Coste	% Uso dedicado	Tiempo de uso	Periodo de depreciación	Coste imputable
<i>Cámara FLIR A325</i>	30000€	80 %	4 meses	60 meses	1600€
<i>Cámara Sensia SIS 384.L</i>	35000€	80 %	4 meses	60 meses	1866.67€
<i>Ordenador portátil gama profesional</i>	1000€	100 %	7.5 meses	60 meses	125€
<i>Tarjeta ExpressCard Imperx</i>	1500€	100 %	7.5 meses	60 meses	187.5€
TOTAL					3779.17€

Tabla A.3: Equipos

En la tabla A.4 se incluyen los gastos no contemplados anteriormente, viajes, dietas y otros gastos varios no atribuibles (material fungible, puesto de trabajo, llamadas telefónicas...). Ascienden, pues, a un total de 700 €.

A partir de estos datos, el presupuesto total es el mostrado en la Tabla A.5.

<i>Descripción</i>	Coste imputable
<i>Filtro interferencial</i>	500€
<i>Cables</i>	200€
<i>TOTAL</i>	700€

Tabla A.4: Otros costes directos

Tabla A.5: *Presupuesto*

Concepto	Importe
Costes personal	35397.14 €
Amortización	3779.17 €
Otros gastos directos	700 €
Costes Indirectos (21 %)	7993.2 €
TOTAL	47869.51 €

APÉNDICE **B**

Panel Frontal del Programa

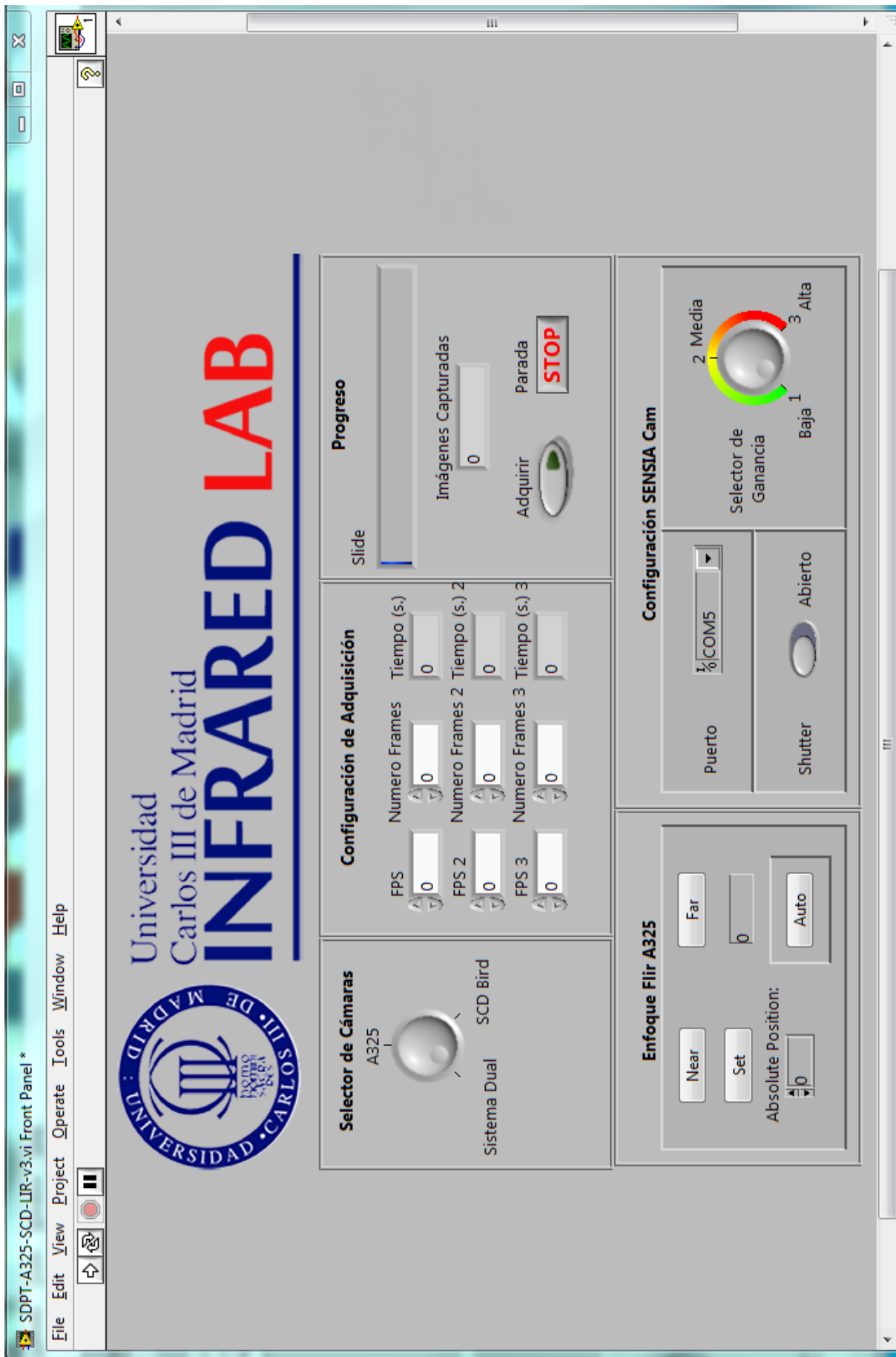


Figura B.1: Panel Frontal

Bibliografía

- [1] Flexible Image Transport System, FITS. <http://fits.gsfc.nasa.gov/>.
- [2] J. S. Byrnes. *Unexploded Ordnance Detection and Mitigation*. Springer, 2009.
- [3] E. L. Dereniak and G. D. Boreman. *Infrared detectors and systems*, volume 306. Wiley New York, 1996.
- [4] FLIR. *Thermovision LabVIEW Toolkit User's Manual*, 3.3.7-rev.a590 edition, February 2012.
- [5] J. M. A. Gallego. *Tesis Doctoral: Espectrometría de imagen en el infrarrojo: una contribución al estudio de las combustiones y a la teledetección de incendios forestales*. Departamento de Física, Universidad Carlos III de Madrid, 2002.
- [6] G. Holst. *Electro-Optical Imaging System Performance*. SPIE Press, 2 edition, 2000.
- [7] G. C. Holst. Testing and evaluation of infrared imaging systems. In *Testing and evaluation of infrared imaging systems/Gerald C. Holst. Winter Park, FL: JCD Pub.; Bellingham, WA: SPIE Optical Engineering Press, c1998.*, volume 1, 1998.
- [8] G. C. Holst. *Holst's Practical Guide to Electro-Optical Systems*. JCD Pub., 2003.
- [9] R. D. Hudson Jr. *Infrared system engineering*. 1969.
- [10] ImperX. *FrameLink Express SDK Help Manual*.
- [11] J. Meléndez. *Curso de técnicas de medida e instrumentación IR*. Departamento de Física, Universidad Carlos III de Madrid, 2011.

-
- [12] Semi Conductor Devices (SCD). *Bird640-384 IR Video Engine-Communication Protocol*, 1.2 rev a46 edition, August 2010. Commercially Restricted.
 - [13] J.-L. Tissot, F. Rothan, C. Vedel, M. Vilain, and J.-J. Yon. Leti/lir's amorphous silicon uncooled microbolometer development. In *Aerospace/Defense Sensing and Controls*, pages 139–144. International Society for Optics and Photonics, 1998.
 - [14] H. Wang, X. Yi, J. Lai, and Y. Li. Fabricating Microbolometer Array on Unplanar Readout Integrated Circuit. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 26:751–762, Apr. 2005.
 - [15] B. Wiecek and R. Olbrycht. New method for on-line microbolometer detector nonuniformity correction. In *16th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry, Budapest, Hungary*, 2009.